

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO.



“METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN ADECUADA DE AISLAMIENTO  
TÉRMICO PARA VIVIENDAS MEXICANAS”

POR

BENJAMÍN ZAMUDIO BARRERA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON  
ORIENTACIÓN EN: ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

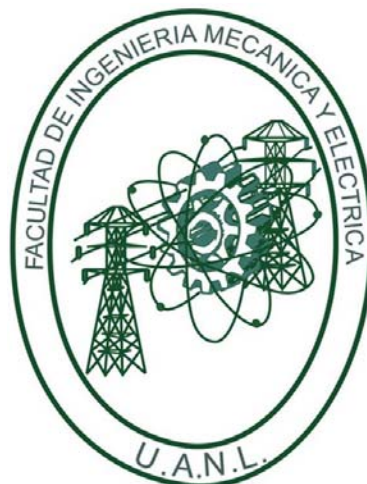
San Nicolás de los Garza, N.L.

Junio de 2010

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO.



“METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN ADECUADA DE AISLAMIENTO  
TÉRMICO PARA VIVIENDAS MEXICANAS”

POR

BENJAMÍN ZAMUDIO BARRERA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON  
ORIENTACIÓN EN: ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

San Nicolás de los Garza, N.L.

Junio de 2010

---

## AGRADECIMIENTOS

Patentizo mi más profundo agradecimiento a personas e instituciones que han hecho posible la culminación del presente estudio y a cada uno de los maestros que han moldeado mi personalidad y formación profesional. Formales e informales, quienes ya han partido, a los actuales y a los que vendrán. Especialmente me refiero:

A la empresa **Owens Corning México**, quien dio apoyo financiero para la realización de este trabajo a través de los proyectos CONACyT, NL-2008-C12-85545: Generar Soluciones de Bajo Costo para el Ahorro de Energía y/o Aumento de Confort Mediante el Aislamiento Térmico a Casas de Interés Social de 40 a 90 m<sup>2</sup> de Construcción, y I0008-2009-NL-136853: Desarrollo del Calculador para ahorro de energía en casas habitación por medio de la modelación térmica. Particularmente me refiero a:

**Dr. Salvador Valtierra Gallardo**, por hacer posible la vinculación entre las empresas y universidades. Creando alumnado más capacitado con sabios consejos, enormes apoyos en diversos recursos, confianza y trato siempre humano.

**Dr. Francisco Javier Tavitas Medrano**, por su abierta disponibilidad y apoyo en los proyectos realizados.

Al Cuerpo Académico de Procesos Termofluidodinámicos y Sistemas Energéticos, por darme la oportunidad de ingresar, aprender y desarrollarme en este nuevo programa de maestría. Especialmente a:

**Dr. Simón Martínez Martínez**, por realizar una maestría en la cual se combina la responsabilidad académica con la elaboración de proyectos empresariales.

---

---

**Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz**, por su dedicada labor de orientar, apoyar, criticar y corregir los manuscritos de esta tesis; así como sus valiosos consejos profesionales.

**Dr. Jesús Chávez Galán**, por sus consejos y asesorías en la elaboración de esta tesis.

A los maestros que dedicaron tiempo valioso para elaborar sus clases e impartirlas con alto agrado a la ciencia. Especialmente a: Dr. Gustavo Rodríguez Morales, Dr. Max Salvador Hernández, M.C. Miguel García Yera.

A mis amigos y compañeros de estudio que fueron partícipes de momentos alegres y difíciles durante mi estancia en la FIME. Especialmente a los que iniciamos esta maestría: Ing. Hugo Ramírez, Ing. Eliud Soto, Ing. Rubén Leal, Ing. Jorge Díaz, Ing. Héctor Hernández, Ing. Eduardo Rodríguez.

A mi familia que me apoyó incondicional desde el inicio de mis estudios...

---

---

## DEDICATORIA

*Con eterno cariño a las personas amadas que se me adelantaron durante mi estancia en los estudios de posgrado:*

*Sra. Paulina Arrellano de Barrera*

*Dama delicada de una dulzura indescriptible, su  
mirada siempre se mantendrá en mi mente y corazón*

*Q.F.I. Verónica Jiménez Palma*

*Compañera audaz de enterna sonrisa e inagotable energía sobre la vida,  
arquitecta de mis cimientos, en mí siempre prevalecerás*

*A Dios... por la promesa realizada y mi continua lucha en el camino de la vida.  
A la Virgen María...*

---

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Introducción</b>	<b>2</b>
<b>1. ANTECEDENTES</b>	<b>4</b>
1.1. El Hogar . . . . .	4
1.2. El confort del ser humano . . . . .	5
1.3. Condiciones climáticas . . . . .	8
1.4. Materiales y tipos de construcción . . . . .	11
1.5. Situación energética y poblacional en México . . . . .	16
1.5.1. Reservas de hidrocarburos . . . . .	17
1.5.2. Producción eléctrica . . . . .	18
1.5.3. Costo de la energía eléctrica . . . . .	20
1.6. El consumo de la energía eléctrica en México . . . . .	22
1.6.1. Crecimiento poblacional . . . . .	26
1.7. El acondicionamiento de aire y el consumo energético . . . . .	28
1.8. Planteamiento del problema . . . . .	31
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>33</b>
2.1. Análisis de la transferencia de calor . . . . .	37
2.1.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) . . . . .	39
2.1.2. Energy-Plus . . . . .	42
2.1.3. Conducción de calor . . . . .	43
2.1.4. Convección de calor . . . . .	47
2.1.5. Radiación de calor . . . . .	48
2.2. Cargas térmicas a través de la envolvente del recinto . . . . .	49
2.2.1. Transferencia de calor en techos . . . . .	50

2.2.2.	Transferencia de calor en muros . . . . .	53
2.2.3.	Puentes térmicos. Uniones entre muros y techos . . . . .	56
2.2.4.	Carga térmica a través de las ventanas . . . . .	59
2.3.	Simulación de una casa típica . . . . .	63
2.3.1.	Estudio de una casa considerando la ubicación, orientación y el aislamiento . . . . .	63
2.3.2.	Consideraciones para simulación de una casa típica . . . . .	65
2.4.	Generalización de resultados para casas típicas . . . . .	66
2.5.	Generación de soluciones óptimas . . . . .	72
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>74</b>
3.1.	Transferencia de calor en muros y techos . . . . .	74
3.1.1.	Techos exteriores . . . . .	74
3.1.2.	Muros exteriores . . . . .	79
3.1.3.	Uniones entre muros y techos . . . . .	87
3.1.4.	Estudio de ventanas . . . . .	92
3.2.	Simulación de una casa típica . . . . .	97
3.2.1.	Ubicación y orientación . . . . .	98
3.2.2.	Aislamiento . . . . .	101
3.3.	Generalización de resultados para casas típicas . . . . .	105
3.3.1.	Exactitud de la metodología . . . . .	107
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>112</b>
4.1.	Conclusiones . . . . .	112
4.2.	Recomendaciones . . . . .	117
4.3.	Recomendaciones para trabajos posteriores . . . . .	118

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Formas de transferencia de calor entre el cuerpo y el ambiente [7]. . .	6
1.2. Condiciones de confort según el modelo de Olgyay [7]. . . . .	8
1.3. Movimiento de rotación de la tierra alrededor del sol. . . . .	10
1.4. Trayectoria solar sobre el plano del observador. . . . .	11
1.5. Distribución de las regiones climáticas en México según la clasificación de Köppen-Geiger [13]. . . . .	13
1.6. Esquema de una ventana con doble vidrio. . . . .	14
1.7. Reservas de hidrocarburos al 1° de enero de 2010. Los datos están en miles de millones de barriles equivalentes de crudo. Cifras preliminares publicadas por PEMEX. . . . .	18
1.8. Reservas al 1° de enero en miles de millones de barriles equivalentes de crudo. Cifras preliminares publicadas por PEMEX. . . . .	19
1.9. Generación bruta de energía eléctrica en GWh. Datos publicados por la Subsecretaría de Electricidad. . . . .	19
1.10. Distribución del consumo eléctrico por sector y usuarios en 2008 [19].	23
1.11. Uso de la energía eléctrica en México. Datos publicados por CFE en 2008. . . . .	24
1.12. Distribución de consumo de energía en el hogar. Información publicada por CFE en abril 2006 . . . . .	26
1.13. Curvas típicas de carga horaria respecto a la demanda máxima. Áreas operativas del Norte de México en 2007 (promedio de las áreas Norte, Noroeste y Noreste) [19]. . . . .	26
1.14. Participación en el consumo promedio anual de energía eléctrica por región y estado [19]. . . . .	28



1.15. Efectos que modifican el comportamiento higrotérmico en el interior de una casa habitación . . . . .	30
2.1. Opciones para la posición de la casa que se consideran en este estudio.	34
2.2. Sistema Vigueta-Bovedilla. <i>a)</i> Esquema del sistema. <i>b)</i> Esquema de la estructura. . . . .	51
2.3. Diseño de experimentos empleado para el análisis de las cargas térmicas de los techos . . . . .	52
2.4. Esquema del caso <b>G</b> del análisis de las cargas térmicas en los techos.	52
2.5. Diseño de experimento para muros exteriores. . . . .	53
2.6. Modelo en CAD del muro construido de blocks en 3D que se utilizó en el análisis del caso <b>B</b> . . . . .	54
2.7. Esquema del modelo empujado en los casos <b>E</b> y <b>F</b> . . . . .	55
2.8. Esquema del sistema analizado para evaluar el efecto de los puentes térmicos en las uniones entre muros y techos. . . . .	57
2.9. Esquema del sistema estudiado para evaluar el puente térmico entre el techo y el muro que comparten dos habitaciones que se encuentran a distintas temperaturas. . . . .	58
2.10. Casos estudiados para el análisis del puente térmico entre el techo y los muros. . . . .	58
2.11. Modelo físico para la evaluación de la efectividad de distintos filtros solares. . . . .	60
2.12. Modelo físico empleado para la evaluación de los filtros solares . . . .	61
2.13. Interior de una cavidad de la maqueta para la caracterización de filtros solares . . . . .	61
2.14. Modelo físico antes del inicio de la prueba. . . . .	62
2.15. Modelo físico durante la prueba. . . . .	62
2.16. Bosquejos de seis diseños que son típicos en la región noreste de México y que fueron analizados en la etapa de generalización de resultados. .	68

2.17. Casos estudiados para generar una base de datos que permita la generalización de los resultados al incluir los principales aspectos relacionados con las cargas térmicas de los elementos de la envolvente. Este diseño de experimentos se aplica para cada uno de los seis modelos de casa que se muestran en la Figura 2.16. . . . .	70
3.1. Distribución de temperaturas en el interior de los techos de concreto. La temperatura interior es de 25°C y la exterior de 40°C. . . . .	76
3.2. Distribución de temperatura en el interior de los techos de vigueta y bovedilla. La temperatura interior es de 25°C y la exterior de 40°C. . . . .	77
3.3. Flujo de calor local en la superficie exterior para los techos de vigueta y bovedilla. . . . .	78
3.4. Gráfico comparativo del flujo de calor y la resistencia térmica equivalente de los techos analizados. . . . .	80
3.5. Contornos de temperatura en los muros. La temperatura interior es de 25°C y la exterior de 40°C. . . . .	81
3.6. Flujo de calor local en la superficie exterior de los muros. . . . .	83
3.7. Distribución de temperatura y vectores de velocidad del aire en el interior del block hueco de concreto en el caso <b>B</b> . . . . .	84
3.8. Distribución de temperatura en un muro de block de concreto relleno de aislamiento térmico, caso <b>C</b> . . . . .	85
3.9. Distribución de temperatura y vectores de velocidad para un muro de concreto con cavidades llenas de aire, caso <b>E</b> . . . . .	86
3.10. Gráfico comparativo del flujo de calor y la resistencia térmica equivalente para los distintos casos de muros analizados. . . . .	88
3.11. Distribución de temperatura en la unión entre muro interno y externo. . . . .	89
3.12. Flujo de calor local en la superficie exterior para la unión entre muros externo e interno. . . . .	90
3.13. Contornos de temperatura para la unión de techo con paredes de habitaciones contiguas. . . . .	91
3.14. Gráficas de las temperaturas de las láminas instrumentadas en función del tiempo momentos después de que quedan expuestas a la radiación solar. El experimento inició a las 11:54 am. . . . .	95

3.15. Temperatura en la superficie de cada placa de aluminio en dos horarios de prueba. . . . .	96
3.16. Gráficos de pastel para distribución de la ganancia de calor anual en los componentes de la envolvente de la casa 3. Se muestran todas las combinaciones posibles de orientación y posición. . . . .	100
3.17. Gráficos de pastel de la ganancia de calor en una semana de verano para muros frontales, posteriores, izquierda, derecha y techo. Se muestran las distintas combinaciones de orientación y ubicación. . . .	102
3.18. Gráfico de enfriamiento sensible requerido en un año para la casa 3 con orientación norte y posición centrada. . . . .	105
3.19. Gráfico comparativo del enfriamiento sensible requerido en un año y el volumen de fibra de vidrio aplicado para las distintas opciones de aislamiento térmico. Los datos corresponden a la casa 3 con orientación al norte y posición centrada. . . . .	106
3.20. Histograma de frecuencias para las diferencias entre los resultados del simulador y los calculados con la metodología para el enfriamiento sensible requerido en un año. . . . .	109
3.21. Histograma de frecuencias para las diferencias entre los resultados del simulador y los calculados con la metodología para el ahorro en el enfriamiento sensible en un año. . . . .	111

# ÍNDICE DE TABLAS

---

1.1. Radiación térmica global y difusa en diferentes condiciones de nubosidad [10]. . . . .	9
1.2. Clasificación climática según Köppen [12]. . . . .	12
1.3. Tipo de precipitación según la clasificación de Köppen[12]. . . . .	12
1.4. Tipo de temperatura según la clasificación de Köppen[12]. . . . .	12
1.5. Resultados de los módulos con vidrios y techos diferentes para estudio de viviendas [15]. . . . .	14
1.6. Precio medio facturado por tarifa del Sistema Eléctrico Nacional (pesos por kWh a precios constantes de 2008). . . . .	21
1.7. Historial de ventas internas totales de CFE por sector (%) [19]. . . . .	23
1.8. Historial del porcentaje correspondiente a cada sector (%). . . . .	25
1.9. Consumo total por región entre 1997 y 2007 en GWh. . . . .	27
1.10. Usuarios y consumo de energía eléctrica por entidad federativa en Septiembre de 2009 [20]. . . . .	29
2.1. Evolución de herramientas de diseño de cálculo y predicción de cambios de energía en recintos cerrados. . . . .	40
2.2. Listado de propiedades de los materiales utilizados en los análisis de los muros y techos de acuerdo a la referencia [36]. . . . .	50
2.3. Características de los filtros solares usados en el modelo físico. . . . .	61
2.4. Descripción de casos analizados para evaluar el efecto del aislamiento térmico de una casa. . . . .	64
2.5. Características de los muros y losas utilizados. . . . .	66
2.6. Propiedades de los acristalamientos, incluyendo el coeficiente global de transferencia de calor $U$ . . . . .	66

2.7. Estimación de la media aritmética del flujo de calor en el techo en los seis modelos de casas habitación. . . . .	71
3.1. Resultados de la transferencia de calor a través de los techos. . . . .	79
3.2. Resultados del análisis de transferencia de calor en los muros. . . . .	87
3.3. Resultados del calor transferido a través de tres diferentes superficies en el análisis de la unión entre un muro exterior y uno interior. . . . .	90
3.4. Resultados del análisis de la transferencia de calor en la unión del techo con las paredes de habitaciones contiguas. . . . .	92
3.5. Resultados del análisis de la ganancia de calor de un cuerpo que es expuesto a la radiación solar que atraviesa un acristalamiento protegido con distintos filtros solares. . . . .	97
3.6. Resultados obtenidos para ganancia de calor anual a través de la envolvente de la casa analizada atendiendo a su ubicación y orientación. . . . .	98
3.7. Resultados de la carga térmica en los techos y muros, de acuerdo a su orientación. Los datos corresponden a la semana del 27 julio al 2 de agosto. . . . .	101
3.8. Dimensiones de las superficies de la casa # 3. . . . .	101
3.9. Carga térmica por unidad de superficie para los cinco grupos de la envolvente de la casa 3. Los datos corresponden a la semana del 27 julio al 2 de agosto. . . . .	103
3.10. Enfriamiento sensible requerido en un año para la casa 3 aislada con fibra de vidrio, con orientación norte y posición centrada. Se incluyen los valores de la superficie aislada y el volumen de fibra de vidrio necesario para hacerlo. . . . .	104
3.11. Tabla de distribución de frecuencia y frecuencia relativa acumulada para las diferencias entre los resultados del simulador y los calculados con la metodología para el enfriamiento sensible requerido en un año. . . . .	108
3.12. Tabla de distribución de frecuencia y frecuencia relativa acumulada para las diferencias entre los resultados del simulador y los calculados con la metodología para el ahorro de enfriamiento sensible requerido en un año. . . . .	110

# INTRODUCCIÓN

---

Una de las necesidades fundamentales que el hombre debe satisfacer en su vida cotidiana consiste en contar con un sitio que le permita refugiarse de las inclemencias del tiempo. El lugar en cuestión, debe también permitir que el hombre realice con facilidad sus actividades personales y productivas. Se espera entonces que el sitio de seguridad en condiciones confortables para una amplia variedad de actividades.

Los cambios de las condiciones climatológicas a lo largo del año y la variedad de actividades que desarrolla el hombre no permiten, en general, que las condiciones en el interior de los recintos sean siempre confortables. Las adecuaciones que se hacen en la búsqueda de condiciones más cómodas requieren del uso de recursos materiales y energéticos.

En la actualidad se recurre de manera sistemática al uso de sistemas de acondicionamiento de aire para dar confort higrotérmico a los recintos habitables, lo que conduce a un alto consumo de los energéticos necesarios para la obtención de la energía eléctrica que requieren los sistemas de climatización. Este aspecto se ha complicado recientemente debido al crecimiento poblacional en regiones con condiciones climatológicas desfavorables y al alto costo de los energéticos.

El consumo de energía en edificios residenciales y comerciales representa una parte importante del uso de los recursos energéticos del país. Los principales materiales utilizados en la construcción de viviendas para uso habitacional en México son los blocks de concreto, el concreto, los ladrillos recocidos y los sistemas vigueta-bovedilla. Todos ellos se caracterizan por sus funciones estructurales y de alta duración, sin embargo, oponen poca resistencia al flujo de calor. Esto favorece el cambio de la temperatura en el interior de los recintos y, en consecuencia, el uso de sistemas de acondicionamiento de aire.

La aplicación de aislamientos térmicos en los muros y techos representa una alternativa atractiva para reducir los consumos de energía requeridos para mantener las condiciones de confort en las casas. Mediante esa solución se incrementa la resistencia de los muros y los techos al flujo de calor, lo que conduce a una reducción importante en la carga térmica que debe abatir el sistema de acondicionamiento de aire. Adicionalmente, se logra una reducción favorable en el impacto ambiental al disminuir la emisión de contaminantes asociada a la generación de energía eléctrica.

No obstante que el aislamiento térmico es conveniente, en México existe información insuficiente que permita una selección adecuada de los aislantes, por lo que con frecuencia los consumidores potenciales declinan en el uso de esa opción. La aplicación de aislantes representa una inversión que en ocasiones el sector doméstico no está en condiciones de pagar. Entonces resulta necesario contar con una herramienta práctica que permita predecir los beneficios que realmente se pueden esperar con el uso de aislamientos térmicos disponibles comercialmente, además de identificar las zonas de la casa que al aislarse producen mayores beneficios al usuario.

A través del uso de programas computacionales es posible obtener información relacionada con la carga térmica en los recintos y la reducción en el consumo de energía requerida para mantener las condiciones de confort en las construcciones habitacionales. Los aspectos relevantes que debe cubrir el análisis incluyen a las condiciones meteorológicas del sitio, los materiales empleados en la construcción, la orientación y la ubicación de la casa, sus dimensiones y diseño.

En este trabajo se realiza el análisis de una amplia variedad de modelos de casa habitación típicas en el noreste de México. Se consideran los aspectos más importantes relacionados con el consumo de energía de los sistemas de acondicionamiento de aire. Específicamente, se evalúan de forma cuantitativa las ventajas que se obtienen con el uso de aislamientos térmicos. Se presenta además, una metodología para la evaluación del ahorro en el consumo de energía en casas habitación típicas. Los resultados obtenidos de las simulaciones se organizaron en una base de datos que se empleó en un programa de cómputo que permite estimar las ventajas del uso de aislantes. El programa, al hacer uso de la información obtenida de una amplia variedad de diseños y condiciones, es capaz de estimar las ventajas que se pueden esperar en casas de diseño y dimensiones hasta cierto punto arbitrarias.

---

---

# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

---

### 1.1. El Hogar

El ser humano se enfrenta continuamente a la necesidad de buscar refugio ante las inclemencias del clima. El hombre primitivo que se cubría de espeso pelambre y pieles de animales utilizaba grietas, oquedades de montañas, acandilados y cavernas para protegerse del clima y sus depredadores. Con el uso del fuego como herramienta el hombre logró mejorar sustancialmente la condición del recinto habitado, lo que dio origen al concepto de hogar como el *sitio donde se enciende el fuego* [3].

Posteriormente, la vivienda que se procuraba el hombre consistían en cabañas rudimentarias que contaban con pieles extendidas en la entrada, junto a éstas se localizaba el hogar que se conservaba siempre encendido. En el año 7,000 a.C. ya existían casas de dos niveles construídas con muros de adobe reforzados con postes de madera a modo de castillos que sostenían la techumbre plana con dos vigas madrinas principales y un entramado de troncos pequeños en su parte superior. Las primeras casas hechas de ladrillo fueron egipcias, arquitectura considerada como la más antigua, donde nació la arquitectura monumental hecha a base de ladrillos sin cocer.

El tiempo trajo consigo numerosos cambios en todas las culturas del mundo. El desarrollo de nuevos materiales de construcción, como el hierro colado, el acero laminado y el vidrio plano, dio la posibilidad de nuevos tipos de construcciones. En el año 1854, el francés Lambot fue el primero en exponer una fabricación de hormigón armado con alambre. François Coignet propuso en el año 1861 la aplicación del hormigón armado para techos, paredes de carga, bóvedas y tubos [4].



En la actualidad existe una gran variedad de tipos de casas habitación que emplean distintos materiales de construcción como madera tratada, blocks de concreto, ladrillos de arcilla de distintas formas y tamaños; incluso existe la tecnología de bombeo de concreto para la fabricación masiva de casas monolíticas. Se cuenta además con materiales modernos que favorecen el aislamiento acústico y térmico.

La necesidad de protección puede quedar resuelta, sin embargo el confort que experimenta el hombre puede ser insatisfactorio. Es entonces necesario considerar también que los hogares debe ser recintos diseñados y construidos de tal forma que el habitante experimente una sensación de confort. Existen varios factores que determinan el grado de satisfacción y confort de los recintos habitables, entre ellos, la localización geográfica, el clima, tamaño, materiales empleados en la construcción, disponibilidad de espacio, iluminación, color, temperatura, humedad, velocidad del aire, entre otros.

## 1.2. El confort del ser humano

La sensación de Confort involucra todo aquello que produce bienestar y comodidad, por lo que está relacionado con cualquier agente que produzca sensaciones, agradables o desagradables, que faciliten o impidan que el ser humano se concentre en lo que tiene que hacer. El mejor indicador de la sensación global durante una actividad es la de indiferencia frente al ambiente, esa situación es el confort. Finalmente, para realizar una actividad el ser humano debe ignorar el ambiente, es decir, debe tener confort [5].

Debido a las variaciones estacionales del clima, la sensación de calor y frío durante el año es muy variable, lo que hace que el confort resulte hasta cierto punto complicado mantener. Específicamente, la condición climática está relacionada con los siguientes aspectos:

- Temperatura del aire
  - Radiación de calor
  - Movimiento del aire
  - Humedad
-

- Grado higrotérmico.

La apreciación subjetiva de la sensación de confort higrotérmico no es más que el resultado combinado de las condiciones mencionadas, y por esta razón se conoce como temperatura resultante. El metabolismo hace disipar del cuerpo humano una cantidad de calor, debiéndose realizar en forma regular. Si se acelera, la piel se enfría, lo cual provoca desde molestias hasta la muerte de los tejidos por congelación. Si la pérdida de calor disminuye, la sudoración restablece el equilibrio, llegando a resecarse el organismo por un exceso de transpiración. El confort higrotérmico no es otra cosa que el mantenimiento de un ambiente que permita la regulación normal para el ser humano [6].

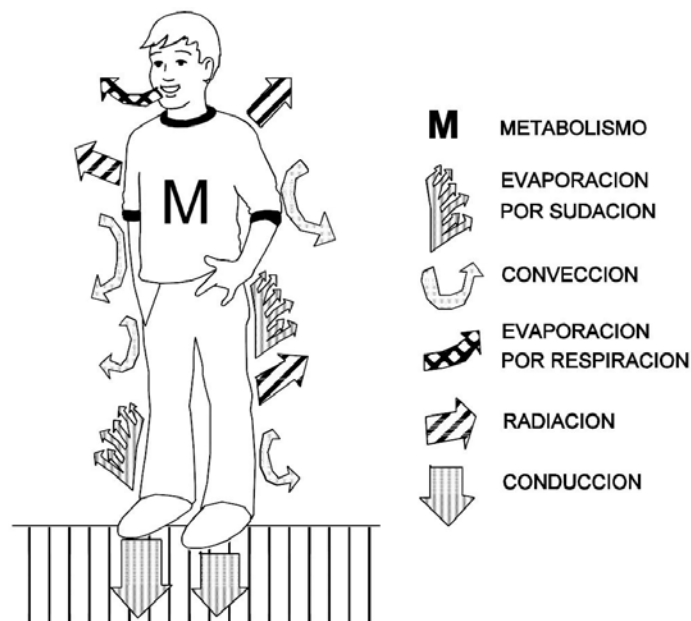


Figura 1.1: Formas de transferencia de calor entre el cuerpo y el ambiente [7].

El cuerpo humano transfiere calor y humedad con el ambiente por evaporación, conducción, radiación y convección como lo muestra la Figura 1.1. Se estima que el cuerpo humano pierde  $2/5$  partes de su calor a través de la radiación,  $2/5$  partes a través de la convección y  $1/5$  parte por evaporación, sin embargo, estas proporciones pueden cambiar por varias causas, principalmente relacionadas con las variaciones en las condiciones térmicas [7, 8].

A lo largo del tiempo, las viviendas y edificaciones han evolucionado enormemente y han integrado a la tecnología para mantener el nivel de confort adecuado. Las necesidades y estándares de confort son cada vez más específicos y en el afán de satisfacerlos se ha tomando ventaja de los avances tecnológicos en el área del acondicionamiento de aire.

El hombre percibe el confort de una manera tan relativa que es imposible decir que existan parámetros de diseño fijos para el control de temperaturas del aire del espacio, puesto que los factores involucrados en la sensación de confort incluyen la época del año, el nivel de humedad de la atmósfera, el efecto de la radiación de los cuerpos, el tipo de ropa que se utilice, la velocidad del aire interno y primordialmente la sensación de bienestar térmico, que es propia de cada persona en lo individual. Sin embargo, hay ciertos rangos en los que puede considerarse que existe una conformidad generalizada de bienestar térmico. Estos rangos se encuentran publicados en la literatura especializada y se presentan de forma resumida en documentos elaborados por asociaciones y sociedades profesionales como la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) [5].

En general, las variaciones estacionales extremas de calor y frío son mayores a lo que la mayoría de la gente puede soportar, aún en las zonas templadas. Los márgenes de temperatura dentro de los cuales la gente se siente cómoda depende en gran parte de la ropa que usa, el grado de actividad física y el contenido de humedad de la atmósfera. La Figura 1.2 propuesta por Olgyay [7] muestra los límites en la condición higrotérmica para el confort de personas ocupadas en actividades ligeras dentro de recintos.

El acondicionamiento del aire de los recintos implica mucho más que el mero control de la temperatura. En realidad es la combinación de tres las características del aire que afectan al confort humano [7]:

1. Temperatura.- El adecuado control de la temperatura del medio ambiente que circunda al cuerpo humano elimina el esfuerzo fisiológico de adaptación, obteniéndose con ello un mayor confort y la consiguiente mejora del bienestar físico y de las condiciones de salubridad.
-

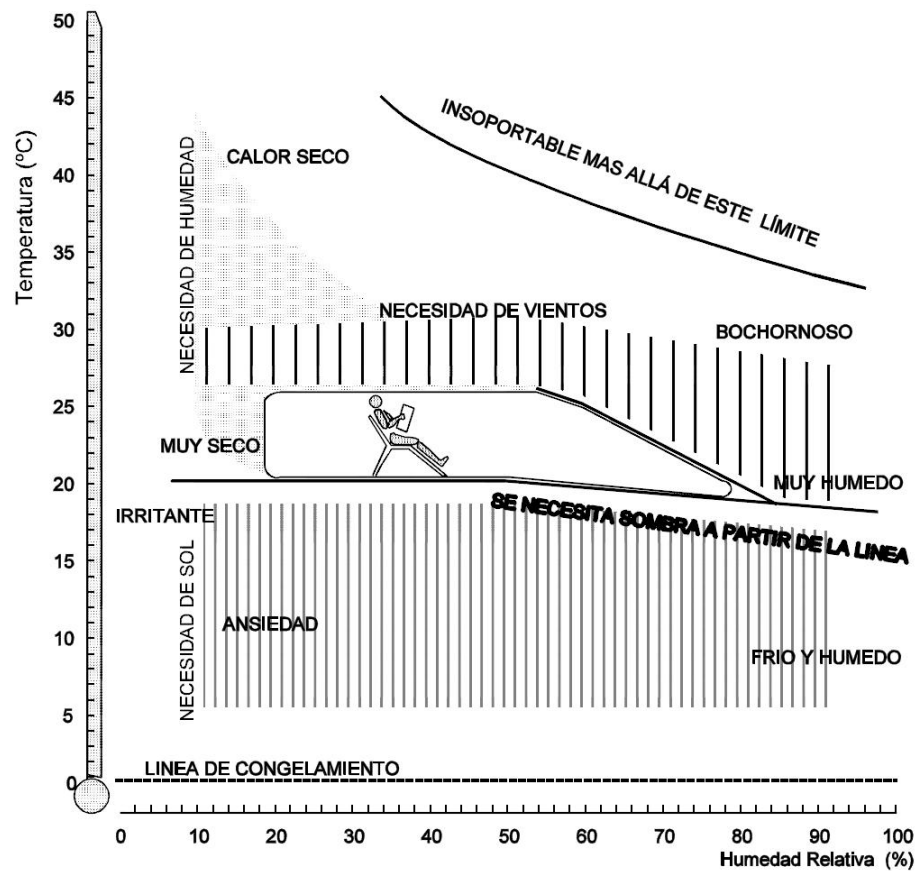


Figura 1.2: Condiciones de confort según el modelo de Olgyay [7].

2. Humedad.- Una gran parte del calor que posee el cuerpo humano se elimina por evaporación a través de la piel. La evaporación se favorece con una humedad relativa baja del aire y se retarda si ésta es alta.
3. Movimiento del aire.- El movimiento del aire sobre el cuerpo humano incrementa la cantidad de humedad y calor eliminados por el cuerpo, dando ello lugar a que la sensación de calor o frío experimente variación.

### 1.3. Condiciones climáticas

La ubicación geográfica de un recinto para uso habitacional, comercial o industrial, es un factor clave que afecta el comportamiento de los flujos de energía entre dicho recinto y el medio ambiente. La diversidad de materiales de construcción

propios de la región, que en general tienen propiedades térmicas distintas, los usos y costumbres de la gente, el uso de equipo eléctrico de distinta índole y capacidades, entre otros, afectan el comportamiento de las cargas térmicas del lugar. No obstante la gran cantidad de variables antes comentadas, la gran diferencia que existe entre las zonas climatológicas del planeta representa el aspecto más relevante. Los efectos más notables que el medio ambiente tiene sobre los recintos se deben principalmente a dos mecanismos: La radiación solar sobre el lugar, mismo que varía con la rotación de la tierra alrededor del sol y con la rotación sobre su propio eje, y los flujos convectivos naturales como los vientos y las corrientes marítimas [9].

En ciertos países y para ciertas épocas del año, se puede considerar a la radiación solar como la mayor afectación térmica sobre una construcción, llegando a ser del orden del 70 % de las ganancias térmicas totales [9]. La radiación proveniente del sol se atenúa al ingresar a la atmósfera disminuyendo su valor respecto al dado en la cima de la atmósfera. En las condiciones más óptimas, en cuanto a la transmisión atmosférica, la atenuación de la radiación en la superficie es de un 25 %. Por esa razón, la irradiancia de  $1000 \text{ W/m}^2$  se utiliza como valor estándar de referencia en la ingeniería relacionada con la energía solar. Adicionalmente, a consecuencia del paso de la radiación solar a través de la atmósfera, la energía que llega a la superficie tiene dos componentes, la primera denominada radiación directa que corresponde a aquella que no ha sido alterada por la presencia de la atmósfera y llega directamente desde el disco solar hasta la superficie, y la segunda, la radiación difusa que procede del resto de direcciones [10].

El porcentaje de una u otra componente respecto a la radiación global depende principalmente de las condiciones meteorológicas, según se puede apreciar en la Tabla 1.1. Cuanto más nublado es el día mayor es la radiación difusa; en días despejados la componente directa representa el porcentaje mayoritario [11].

Tabla 1.1: Radiación térmica global y difusa en diferentes condiciones de nubosidad [10].

Condiciones climáticas	Irradiancia ( $\text{W/m}^2$ )	Componente difusa (%)
Cielo claro	750-1000	10-20
Parcialmente nublado	200-500	20-90
Completamente cubierto	50-150	90-100

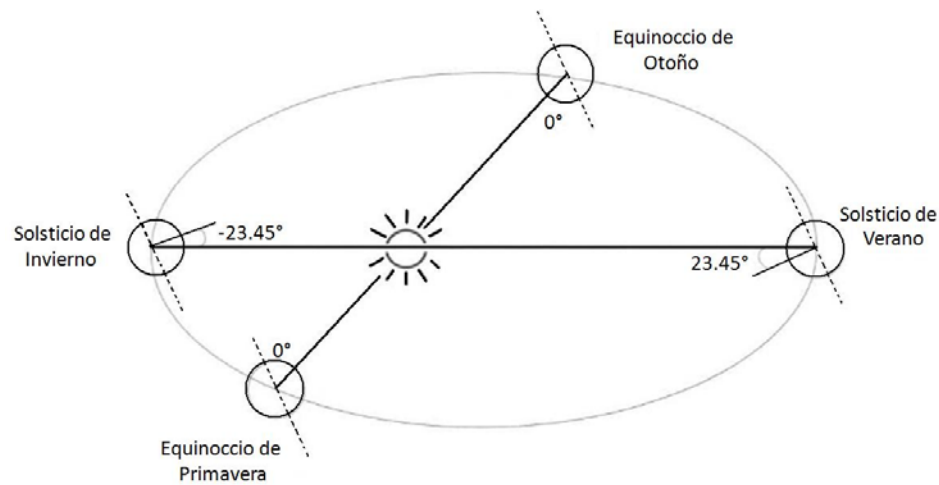


Figura 1.3: Movimiento de rotación de la tierra alrededor del sol.

Por otro lado, la incidencia de la radiación solar también depende del ángulo con el que incide sobre la superficie de la tierra. El ángulo cambia debido al movimiento de la tierra sobre su eje, mismo que está inclinado  $23.5$  grados en relación a la dirección normal al plano elíptico, según puede observarse en la Figura 1.3 [12].

Desde el punto de vista de un observador sobre la superficie de la tierra, el sol parece describir un arco de círculo desde la salida (orto) hasta la puesta (ocaso), como se puede apreciar en la Figura 1.4. Además de este movimiento diario, el sol tiene un segundo movimiento aparente el cual sólo podría observarse si pudiera dejarse registrado día tras día y se manifiesta como trayectorias paralelas cada día. La posición del sol para cualquier mes del año y hora del día se define por dos ángulos: azimut del sol (ángulo que forma la proyección horizontal del rayo solar con el eje que une los puntos cardinales norte-sur y que se mide en el sentido de las manecillas del reloj) y la altura solar (ángulo que forma el rayo solar con su proyección horizontal).

Debido a la trayectoria del sol, la radiación solar varía a lo largo del día y ese efecto se manifiesta a través de la elevación de la temperatura en la superficie terrestre y en la atmósfera. Adicionalmente, la trayectoria del sol produce el calentamiento de las superficies de los cuerpos que están expuestos, y ese calentamiento es máximo para las superficies que son perpendiculares a la trayectoria del rayo solar.

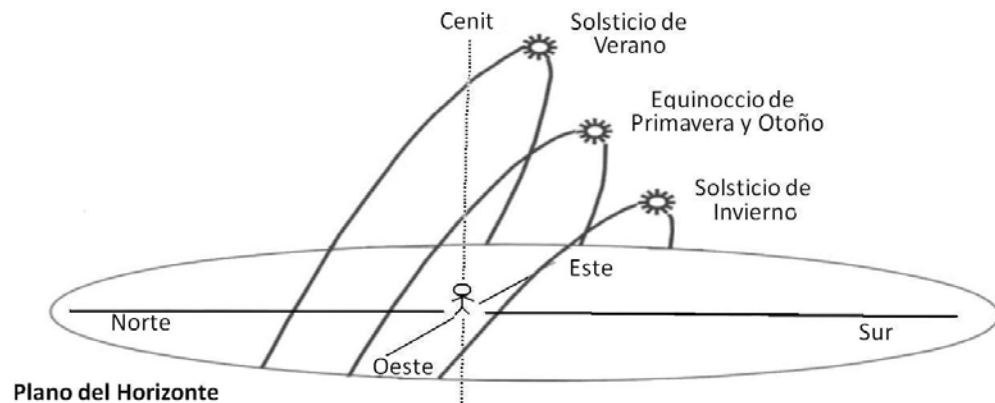


Figura 1.4: Trayectoria solar sobre el plano del observador.

Existe una clasificación climática debida a Köppen, ésta es la más conocida y más ampliamente aplicada por los geógrafos. El punto fundamental de esa clasificación consiste en considerar que la vegetación natural constituye un indicador del clima. Algunas de las categorías resultantes están apoyadas en los límites climáticos de ciertas formas de vegetales. Los climas quedan entonces definidos por los valores medios anuales y mensuales de temperatura y precipitación. Con esos criterios quedan definidos los cinco grandes grupos indicados mediante letras mayúsculas que se muestran en la Tabla 1.2 [12, 13].

Los grupos anteriores se dividen a su vez en subgrupos más específicos mediante letras minúsculas teniendo en cuenta la distribución estacional de las precipitaciones de acuerdo a la Tabla 1.3, con el objeto de describir mejor el régimen térmico se usa una tercera letra, como se muestra en la Tabla 1.4.

## 1.4. Materiales y tipos de construcción

Un recinto puede perder o ganar energía hacia o desde afuera y hacerlo lenta o rápidamente. Esto dependerá de manera importante de los materiales con los que está construida, de la temperatura del medio ambiente, la condición interna, entre otras. Una parte importante de la energía que intercambia el recinto con el medio ambiente ocurre por conducción de calor a través de las paredes, techos y ventanas. Además, por radiación se transfiere una gran cantidad de calor través de las propias ventanas. El gradiente de temperatura que existe entre las superficies internas y

Tabla 1.2: Clasificación climática según Köppen [12].

---

A	<b>Clima tropical lluvioso.</b> Todos los meses la temperatura media es superior a 18°C. No existe estación invernal y las lluvias son abundantes.
B	<b>Climas secos.</b> La evaporación es superior a la precipitación. No hay excedente hídrico.
C	<b>Climas templados y húmedos.</b> El mes más frío tiene una temperatura media comprendida entre 18°C y -3°C, y la media del mes más cálido supera los 10°C.
D	<b>Climas templados de invierno frío.</b> La temperatura media del mes más frío es inferior a -3°C y la del mes más cálido está por encima de 10°C
E	<b>Climas polares.</b> No tienen estación cálida y el promedio mensual de las temperaturas es siempre inferior a 10°C. Cuando el mes más cálido oscila entre 0 y 10°C de temperatura media Köppen diferencia el grupo ET (Clima de tundra) y en el caso de que ningún mes supere los 0°C de temperatura media el grupo EF (Clima de hielo permanente)

---

Tabla 1.3: Tipo de precipitación según la clasificación de Köppen[12].

---

f	Lluvioso todo el año, ausencia de periodo seco
s	Estación seca en verano
w	Estación seca en invierno
m	Precipitación de tipo monzónico (se encuentra entre los 5° y los 25° de latitud)

---

Tabla 1.4: Tipo de temperatura según la clasificación de Köppen[12].

---

a	Temperatura media del mes más cálido superior a 22 °C
b	Temperatura media del mes más cálido inferior a 22 °, pero con temperaturas medias de al menos cuatro meses superiores a 10 °C
c	Menos de cuatro meses con temperatura media superior a 10 °C
d	El mes más frío está por debajo de -38 °C
h	Temperatura media anual superior a 18 °C
k	Temperatura media anual inferior a 18 °C

---

externas de muros y techos causa la conducción de calor, pero la intensidad de ese gradiente es el resultado del calentamiento de las superficies mediante convección con el aire interno y externo, respectivamente, y por la radiación solar sobre las superficies expuestas a la radiación solar. Adicionalmente, las puertas y ventanas tienen rendijas

---



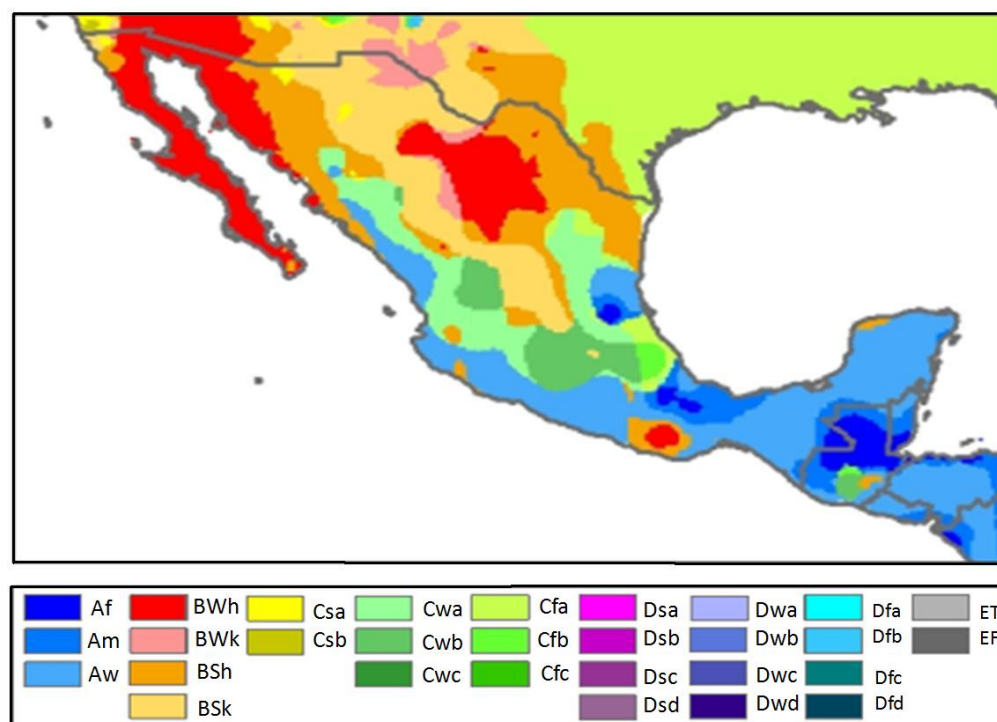


Figura 1.5: Distribución de las regiones climáticas en México según la clasificación de Köppen-Geiger [13].

a través de las cuales existen flujos de aire que también transportan energía. De todos los elementos de una vivienda el vidrio es el que mayor participación tiene en el flujo de calor [15].

Existe una gran variedad de materiales de construcción que pueden ser empleados en viviendas de tipo residencial como el acero, la madera, el vidrio, el concreto, el tabique, entre otros. Existe además una amplia variedad de acabados y texturas tanto interiores como exteriores [16].

En un estudio de viviendas Acoltzi H. y Sánchez I. [15] realizaron experimentos con módulos representativos de casas que fueron expuestos al clima exterior en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México. Se midió y se registró la radiación solar en techos y ventanas, la velocidad de viento, la temperatura en el interior, la diferencia de temperatura en ventanas y techo, temperatura ambiente y consumo de energía por un periodo de 5.6 horas durante los días soleados de junio y julio del año 2000, con las ventanas de prueba orientadas al norte y sur. En la Tabla 1.5 se presentan

los resultados obtenidos, se pueden observar diferencias entre las losas cuando éstas son de distinto material y cuando se usan diferentes tipos de vidrio.

Tabla 1.5: Resultados de los módulos con vidrios y techos diferentes para estudio de viviendas [15].

Techo		Tiempo (h)	Consumo teórico (kWh)	
			Módulo a Escala	Habitación Real
Loza monolítica	Claro	7.66	0.99	5.07
	Filtrasol		0.89	4.87
	Reflectasol		0.84	4.36
Loza vigueta y bovedilla	Claro	5.65	0.66	3.75
	Filtrasol		0.57	3.53
	Reflectasol		0.48	2.97

En una vivienda típica, las ventanas pueden representar entre 15 y 40 % del total de superficie de las paredes. Existen filtros para los vidrios capaces de reducir el flujo de calor como se aprecia en la Tabla 1.5, adicionalmente, para reducir la transferencia de calor a través de los vidrios es adecuado el uso de ventanas de doble cristal, como el que se muestra en la Figura 1.6. En este tipo de ventanas los vidrios están espaciados por un separador, lo que permite aislar al vidrio exterior del contacto con el interior. Esta solución puede representar un ahorro del 5 % al 10 % de energía eléctrica empleada por el equipo de aire acondicionado. Existen modelos comercialmente disponibles en los que el espacio entre los vidrios contiene gas Argón, lo que incrementa su eficacia como aislante del medio exterior [16].

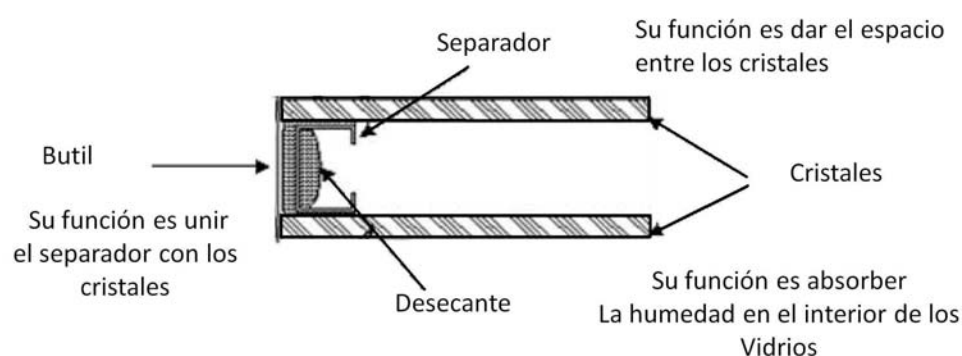


Figura 1.6: Esquema de una ventana con doble vidrio.

Existe una amplia variedad de materiales empleados en la construcción de muros, techos, acabados y pisos de las viviendas mexicanas. A continuación se enumeran algunos de los más comunmente emplados [17]:

#### **Muros**

- Muro de piedra. Constituido por diversas clases de materiales pétreos y podemos clasificarlos según la forma en que la piedra se encuentre labrada.
- Muro de tabique. Este material en todas sus diversas formas y variedades probablemente el más usado para muros de carga tanto interiores como exteriores, hay tabiques compactos perforados y huecos con objeto de llenar las diversas necesidades y proporcionar a los muros características tales como la de impermeabilidad, aislamiento térmico y acústico, mejor adherencia al mortero, menor peso, entre otros.
- Muro ligero de mampostería. Pueden ser hechos de tabique hueco, barro, o bien ligeros de cemento o cal con agregados de tezontle, arena o grava según sea necesario. Son aislantes acústicos y térmicos.
- Muro de adobe. Para este tipo de muro es recomendable impermeabilizar brevemente la superficie del cimientado con el fin de evitar el deterioro por humedad.

#### **Techos**

- Losas reticulares de block de cemento. Este tipo de techo es el más tradicional para nuestra región. La losa es armada por medio de varillas que forman cadenas con estribos de alambrón de manera que se forma una retícula. Los huecos se llenan de block hueco de cemento para aligerar el peso de la losa. El concreto que se emplea debe tener una resistencia de  $200 \text{ kg/cm}^2$ .
  - Losas macizas. Estas se elaboran con un armado de varillas en forma de trama individual firmemente amarrada con alambre recocido, posteriormente se coloca concreto relleno toda la losa.
  - Losa de vigueta precolada y bovedilla. Este tipo de techo se basa en viguetas de concreto precolado con una bovedilla de cemento o poliestireno entre ellas
-

y con una malla de alambre electro-soldado en la parte superior. Esta técnica es ampliamente usada en para casas de interés social debido a que el tiempo para su construcción es corto pero tiene el inconveniente de ser propensa a la aparición de goteras que pueden ser complicadas en su reparación.

- Losa de losacero. Están fabricadas con una lámina de perfiles ondulados que están apoyadas y soldadas sobre viguería de acero, lleva una malla de alambre electro-soldado en la parte superior. Esta se debe colar dentro de una capa de concreto con una resistencia de  $250 \text{ kg/cm}^2$ .

### Acabados

- Aplanados de mezcla. Estos son los que normalmente se les llama enjarre y se elaboran a base de una mezcla de cal, cemento y arena.
- Aplanados de yeso. Este tipo de enjarre es de apariencia lisa y se realiza con una mezcla de yeso agua tiene el inconveniente de que es muy suave y se intemperiza fácilmente con el agua.

### Pisos

- Firmes. Se coloca material inerte (concreto) en el piso de manera que quede de forma horizontal.
- Piso de cerámica. Se coloca el piso sobre un adhesivo especialmente para eso.
- Piso de mosaico. Este se coloca sobre una mezcla de cal, cemento, arena y agua semejante a la que se utiliza en los aplanados.

## 1.5. Situación energética y poblacional en México

Como se ha comentado, la necesidad de contar con un sitio para resguardo puede quedar satisfecha, sin embargo, la sensación de confort requiere de satisfacer varios aspectos que resultan en general más elaborados y en ocasiones subjetivos. Lograr que el entorno se encuentre en condiciones confortables requiere, entre otras cosas, de mantener las condiciones higrotérmicas del sitio controladas en un rango que facilite todas las funciones biológicas del habitante. En razón de que el medio ambiente

---

externo está en constante cambio y que las actividades del hombre son muy variadas a lo largo del día, se requiere que el recinto se adapte y responda de forma dinámica a las variables internas y externas a las que está sujeto. Esto sólo se puede lograr mediante la remoción o adición de calor y humedad del recinto de forma tal que las condiciones permanezcan en el rango de confort. Mantener las condiciones del recinto requiere entonces del uso de energía, desde luego, se requerirá más energía en la medida en que las condiciones internas y externas del recinto favorezcan el cambio de la temperatura y la humedad de éste. Cuando las condiciones climáticas son extremas se requiere de una respuesta rápida e intensa de los sistemas de acondicionamiento ambiental, lo que demandará un consumo importante de energía. En el caso más desfavorable es deseable que al menos los cambios climáticos extremos no afecten de una forma tan intensa las condiciones del recinto.

La energía es un factor estratégico para el desarrollo económico y social del país, por lo tanto, es indispensable aprovechar los recursos energéticos con los que contamos de manera eficiente y sustentable. Esta es la única forma en la que podremos seguir contando con este insumo tan importante para todos los sectores [21]. Una cantidad importante de energía se invierte en el acondicionamiento ambiental de casas habitación. En vista de la situación económica, energética, ambiental y social actual, resulta conveniente analizar dichos aspectos para ponderar la relevancia del uso de productos y tecnologías que favorezcan la disminución del consumo de energía en los sistemas de acondicionamiento de aire. A continuación se expone la situación actual en la que se encuentra México respecto a las reservas de hidrocarburos, producción eléctrica, costos de la energía eléctrica y el crecimiento poblacional.

### 1.5.1. Reservas de hidrocarburos

Las reservas de hidrocarburos se definen como aquellas cantidades de hidrocarburos que se prevé serán recuperadas comercialmente de acumulaciones conocidas a una fecha dada.

PEMEX en sus cifras preliminares reporta una disminución en todas sus reservas de hidrocarburos, ver Figura 1.7. Al 1° de enero de 2010 las reservas probadas de hidrocarburos ascendieron a 13.992 MMbpce (mil millones de barriles de petróleo

---

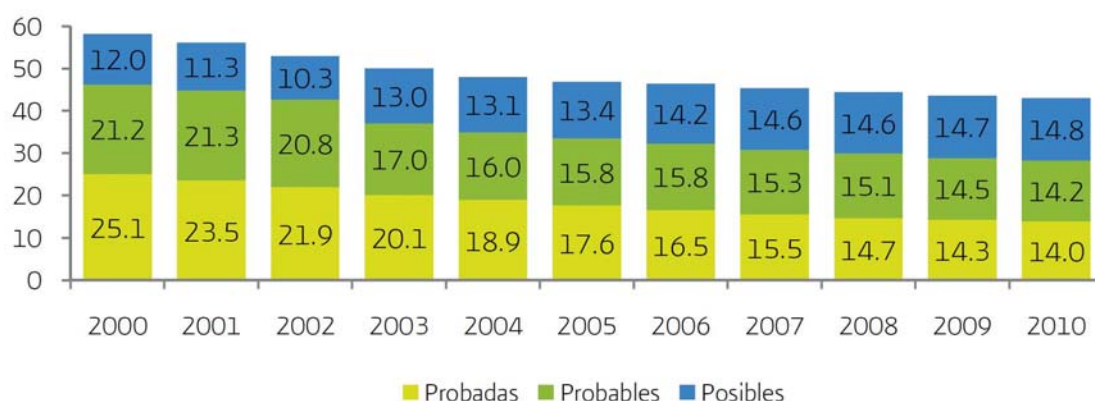


Figura 1.7: Reservas de hidrocarburos al 1° de enero de 2010. Los datos están en miles de millones de barriles equivalentes de crudo. Cifras preliminares publicadas por PEMEX.

crudo equivalente), 2.2% inferior a las registradas en el mismo periodo del año anterior. La relación reservas probadas-producción (cociente que resulta de dividir la reserva entre la producción) es de 10.2 años.

Las reservas 3P (probadas + probables + posibles) totalizaron 43.075 MMbpce, cifra 1.1 % menor a la de 2009. De acuerdo con la información de PEMEX, la variación se explica principalmente por la actividad exploratoria. También destaca una tasa de declinación de reservas más estable. La relación reservas totales-producción fue de 31.3 años.

El 71 % de las reservas totales correspondió a crudo, 20 % a gas natural y 9 % a líquidos del gas, como se muestra en la Figura 1.8. Las reservas totales de crudo disminuyeron 0.433 MMbpce, principalmente por efecto de la producción de 950 millones de barriles de crudo. Las reservas totales de gas natural cayeron 0.116 MMbpce [22].

### 1.5.2. Producción eléctrica

La Secretaría de energía reporta un aumento de la generación bruta de energía eléctrica. En febrero de 2010, se generaron 16,531 GWh, 1.1 % más que en febrero de 2009, como lo muestra la Figura 1.9. Las termoeléctricas aumentaron su generación 6.2% y aportaron 39 % de la electricidad total generada. La generación de los productores independientes creció 0.1 % y alcanzó una participación de 33 %. En

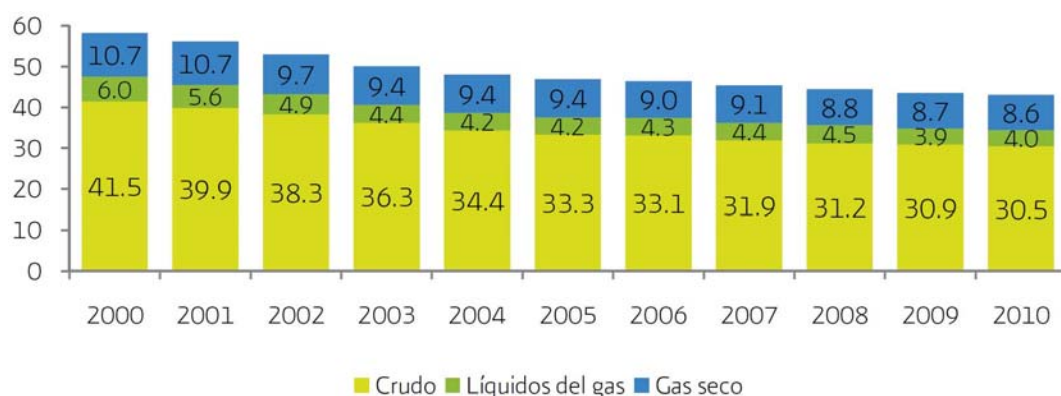


Figura 1.8: Reservas al 1° de enero en miles de millones de barriles equivalentes de crudo. Cifras preliminares publicadas por PEMEX.

las hidroeléctricas se generó 10 % de la energía eléctrica y hubo una caída de 30.2 % respecto a febrero de 2009, esto como resultado de una disminución en el volumen anual de precipitación a nivel nacional. Las carboeléctricas generaron 10 % de la electricidad y aumentaron 1.5 veces dicha generación. La central nucleoelectrica de Laguna Verde generó 3.0 % menos GWh que en enero de 2009, aportando 5 % de la generación total. En las centrales geotermoelectricas, las cuales participaron con 3 % de la generación total, hubo un aumento de 1.3 % en su producción. Finalmente, en la centrales eolicas se generó 28.3 % menos que en febrero de 2009 y su participación fue marginal [22].

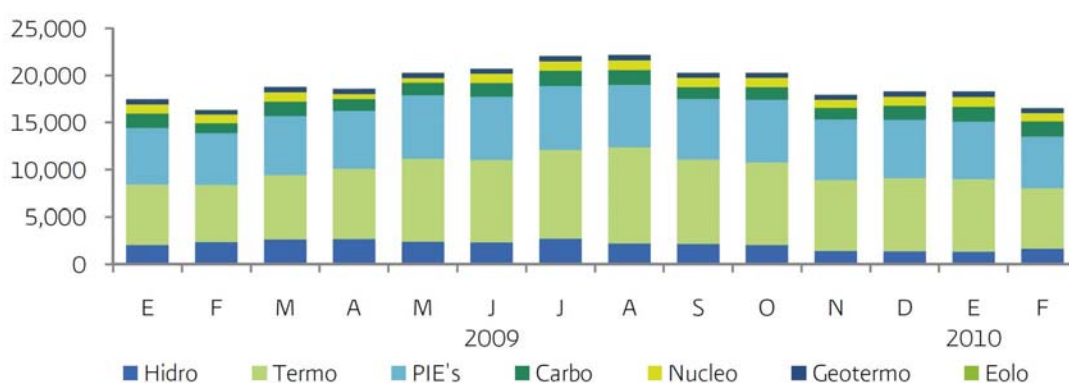


Figura 1.9: Generación bruta de energía eléctrica en GWh. Datos publicados por la Subsecretaría de Electricidad.

### 1.5.3. Costo de la energía eléctrica

La Tabla 1.6 muestra los costos de la energía eléctrica para el periodo 2000-2008. Los precios medios de la electricidad aumentaron en términos reales, debido básicamente al impacto del incremento de los precios de los combustibles. En el sector doméstico, la tarifa residencial tuvo un cambio estructural en 2002 debido a que los usuarios de alto consumo dejaron de recibir subsidios. Por su parte, las tarifas 1 a 1F presentaron incrementos cercanos a la inflación. En 2008 los precios medios en las tarifas 1 a 1F observaron variaciones por debajo de la inflación.

En las tarifas aplicables al sector servicios (5, 5A y 6), los precios medios tuvieron un comportamiento relativamente estable, observando incrementos en términos reales ligeramente por arriba de la inflación en el transcurso de los últimos años. En las tarifas agrícolas los precios medios se incrementaron en forma moderada en virtud de la política de apoyo al sector agrícola a través de las tarifas de estímulo (9-CU y 9-N). Cabe señalar que los cargos de estas tarifas, al igual que las tarifas domésticas (1 a 1F), se ajustan con factores fijos, por lo que no se ven impactados por los importantes incrementos en los precios de los combustibles, lo que en términos reales se ha traducido en un mayor subsidio implícito a los usuarios en estas tarifas. Los cargos de las tarifas en alta, media y baja tensiones aplicables a los sectores comercial e industrial se ajustan en función de la variación de los precios de los combustibles y la inflación nacional, por lo que en los últimos ocho años sus precios medios han observado incrementos muy superiores a la inflación, situación que tuvo su momento más crítico en 2008 cuando los precios de los combustibles alcanzaron sus niveles históricos más altos.

Durante 2008 se aplicaron diversas medidas para reducir el nivel de las tarifas eléctricas aplicables a los sectores industrial y comercial y se crearon las nuevas tarifas con cargos fijos para los usuarios industriales en alta tensión, las cuales eliminan la volatilidad de los combustibles y la inflación y ofrecen cargos fijos durante periodos sucesivos de 12 meses. Para ello se estableció el procedimiento de cálculo y aplicación de la tarifas con cargos fijos y, posteriormente, se hizo extensiva esa opción para los usuarios industriales en media tensión [23].

---



Tabla 1.6: Precio medio facturado por tarifa del Sistema Eléctrico Nacional (pesos por kWh a precios constantes de 2008).

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Aumento 2000-2008
<b>Domestico</b>	<b>0.81</b>	<b>0.82</b>	<b>1.00</b>	<b>1.04</b>	<b>1.04</b>	<b>1.04</b>	<b>1.07</b>	<b>1.07</b>	<b>1.06</b>	<b>31 %</b>
1	0.80	0.82	0.95	0.98	0.97	0.98	0.96	0.95	0.93	16 %
1A	0.76	0.77	0.88	0.89	0.87	0.89	0.90	0.90	0.88	16 %
1B	0.88	0.91	0.93	0.92	0.91	0.92	0.93	0.93	0.90	2 %
1C	0.78	0.80	0.89	0.93	0.93	0.95	0.97	0.98	0.95	22 %
1D	0.80	0.83	0.87	0.89	0.90	0.89	0.92	0.93	0.93	16 %
1E	0.72	0.73	0.86	0.81	0.83	0.83	0.84	0.84	0.82	14 %
1F	-	-	0.75	0.81	0.80	0.81	0.83	0.85	0.82	9 %
DAC	-	-	2.00	2.19	2.41	2.42	2.61	2.59	2.90	45 %
<b>Comercial</b>	<b>1.81</b>	<b>1.77</b>	<b>1.77</b>	<b>1.99</b>	<b>2.20</b>	<b>2.33</b>	<b>2.53</b>	<b>2.52</b>	<b>2.55</b>	<b>41 %</b>
2	1.85	1.79	1.78	2.00	2.22	2.35	2.56	2.54	2.58	39 %
3	1.65	1.62	1.73	1.93	2.09	2.18	2.37	2.34	2.37	44 %
7	3.02	3.03	2.84	3.07	3.61	3.61	3.73	3.57	3.72	23 %
<b>Servicios</b>	<b>1.51</b>	<b>1.53</b>	<b>1.61</b>	<b>1.65</b>	<b>1.66</b>	<b>1.68</b>	<b>1.72</b>	<b>1.75</b>	<b>1.72</b>	<b>14 %</b>
5	1.96	2.01	2.06	2.07	2.10	2.14	2.17	2.24	2.26	15 %
5A	1.64	1.65	1.69	1.71	1.73	1.76	1.81	1.84	1.85	13 %
6	1.13	1.15	1.29	1.37	1.36	1.36	1.39	1.40	1.35	19 %
<b>Agrícola</b>	<b>0.41</b>	<b>0.42</b>	<b>0.43</b>	<b>0.45</b>	<b>0.46</b>	<b>0.49</b>	<b>0.49</b>	<b>0.50</b>	<b>0.51</b>	<b>24 %</b>
9	0.37	0.36	0.36	0.42	0.49	0.57	0.71	0.87	0.98	165 %
9-M	0.41	0.43	0.44	0.48	0.56	0.69	0.84	1.00	1.16	183 %
9CU	-	-	-	0.40	0.46	0.49	0.43	0.45	0.46	15 %
9N	-	-	-	0.39	0.40	0.42	0.37	0.38	0.37	-5 %
<b>Industrial</b>	<b>0.77</b>	<b>0.75</b>	<b>0.79</b>	<b>0.93</b>	<b>1.03</b>	<b>1.08</b>	<b>1.18</b>	<b>1.17</b>	<b>1.40</b>	<b>82 %</b>
O-M	1.01	1.00	1.06	1.23	1.35	1.42	1.56	1.53	1.76	74 %
H-M	0.85	0.81	0.87	1.01	1.11	1.16	1.25	1.25	1.47	73 %
H-MC	-	-	0.96	0.90	0.98	1.07	1.14	1.18	1.41	47 %
H-S	0.74	0.71	0.79	0.92	1.05	1.09	1.15	1.15	1.35	82 %
H-SL	0.65	0.62	0.63	0.75	0.83	0.89	0.99	0.98	1.21	86 %
H-TL	0.54	0.51	0.52	0.63	0.69	0.74	0.83	0.81	1.05	94 %

Nota: Cifras a precios constantes de 2008 con base en el deflactor promedio del Índice Nacional de Precios al Consumidor. Fuente: Comisión Federal Electricidad (CFE)

**1** Doméstico

**1A** Doméstico con temperatura media mínima en verano de 25°C

**1B** Doméstico con temperatura media mínima en verano de 28°C

**1C** Doméstico con temperatura media mínima en verano de 30°C

- 1D** Doméstico con temperatura media mínima en verano de 31°C
- 1F** Doméstico con temperatura media mínima en verano de 32°C
- 1E** Doméstico con temperatura media mínima en verano de 33°C
- DAC** Servicio doméstico de alto consumo
- 2** General hasta 25 kW de demanda
- 3** General para más de 25 kW de demanda
- 5** Alumbrado público (DF, Monterrey, Guadalajara)
- 5A** Alumbrado público (resto del país)
- 6** Bombeo de aguas potables o negras de servicio público
- 7** Temporal
- 9** Bombeo de agua para riego agrícola, baja tensión
- 9-M** Bombeo de agua para riego agrícola, media tensión
- 9CU** Cargo único para uso agrícola
- O-M** Ordinaria general, media tensión, con demanda menor de 1000 kW
- H-M** Horaria general, media tensión, con demanda menor de 1000 kW o más
- H-MC** Horaria general, media tensión, con demanda menor de 1000 kW o más, para corta utilización
- H-S** Horaria general, alta tensión, nivel subtransmisión
- H-SL** Horaria general, alta tensión, nivel subtransmisión, larga utilización
- H-T** Horaria general, alta tensión, nivel transmisión
- H-TL** Horaria general, alta tensión, nivel transmisión, larga utilización

## 1.6. El consumo de la energía eléctrica en México

El consumo y distribución de energía eléctrica en México no es un asunto que esté resuelto, en la actualidad este servicio no llega a todas las comunidades en gran medida debido a que los recursos en el país son limitados y alrededor del 70% de la población es de un estrato socioeconómico bajo, con limitaciones en su capacidad de pago [14].

El consumo interno de energía eléctrica en México se clasifica en cinco sectores: industrial, residencial, comercial, servicios y bombeo agrícola, como lo muestra la Figura 1.10. En magnitud, el sector industrial es el principal consumidor de energía eléctrica, debido a la gran variedad de sistemas y procesos productivos que hacen uso intensivo de este servicio de manera casi continua, consumiendo 58.8 % de las ventas internas en el año 2008. La Tabla 1.7 muestra el historial de consumo por sector. Es evidente el crecimiento del consumo del sector residencial que en 2008 consumió el 25.4 %, con lo cual fue el segundo consumidor de energía eléctrica, seguido por el sector comercial con 7.5 %, luego el agrícola con 4.5 % y finalmente el sector servicios con 3.8 % [19].

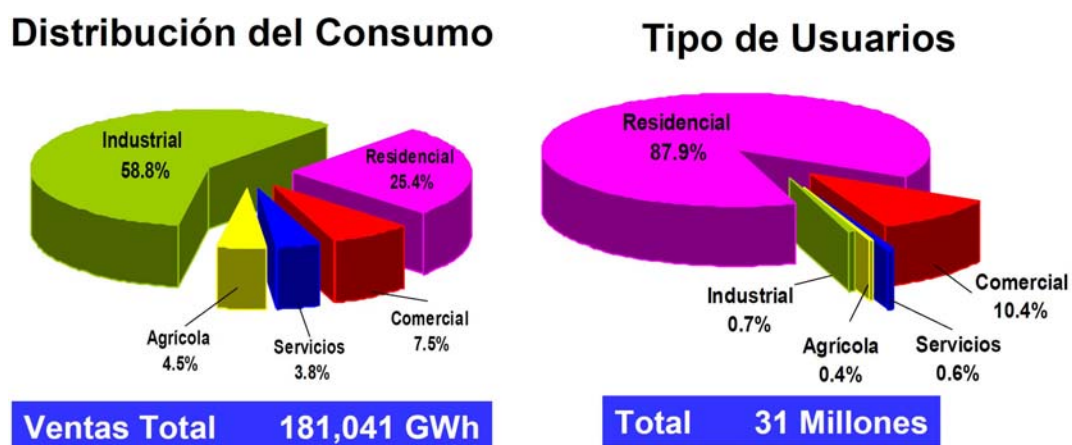


Figura 1.10: Distribución del consumo eléctrico por sector y usuarios en 2008 [19].

Tabla 1.7: Historial de ventas internas totales de CFE por sector (%) [19].

Sector	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009*
Doméstico	25.50	25.59	25.73	26.13	26.21	25.4	27.71
Agrícola	5.55	5.14	5.70	5.42	5.15	4.50	6.75
Industrial	58.82	59.28	58.83	58.80	59.09	58.80	55.24
Comercial	6.86	6.74	6.51	6.45	6.34	7.50	6.33
Servicios	3.26	3.26	3.22	3.20	3.22	3.80	3.98

\*Cifras a septiembre de 2009

El uso de la totalidad de energía eléctrica consumida en México queda bien ilustrada mediante la Figura 1.11. Los mayores consumidores de energía eléctrica

son los motores con 46 %, seguido de la iluminación con 18 %, la refrigeración con un 17 %, el aire acondicionado con 9 % y finalmente 10 % de procesos [26].

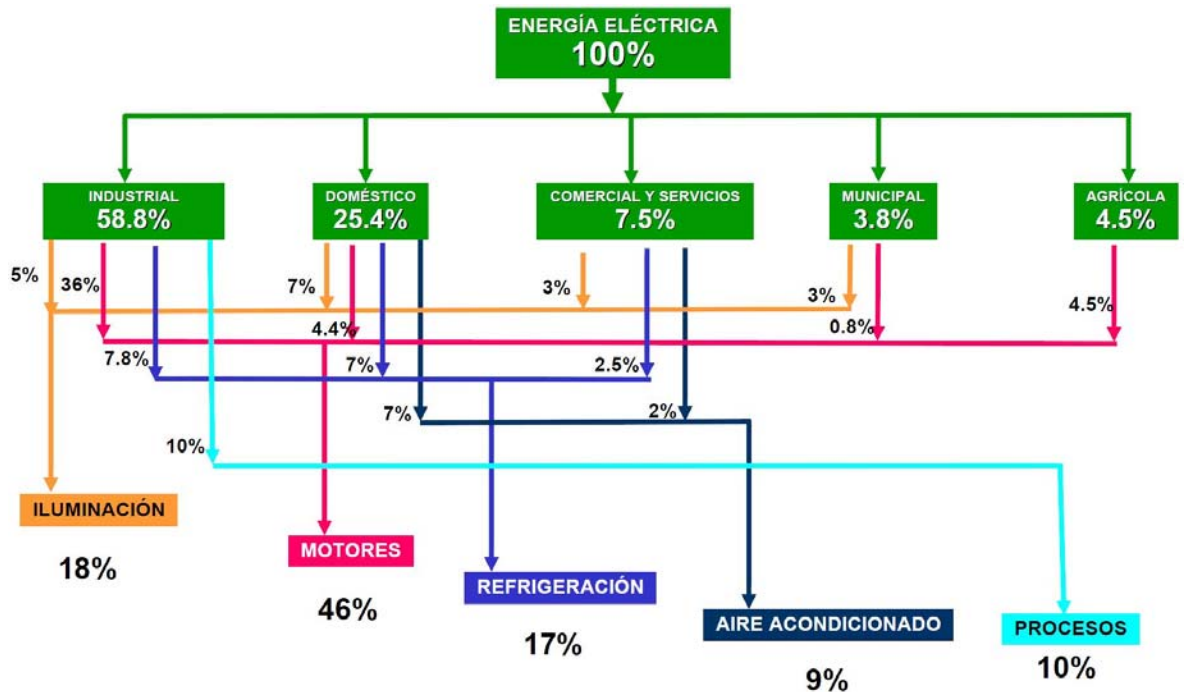


Figura 1.11: Uso de la energía eléctrica en México. Datos publicados por CFE en 2008.

Comisión Federal de Electricidad proporciona servicio de energía eléctrica aproximadamente a 31 millones de clientes, los cuales han tenido una tasa de crecimiento medio anual de casi 4.4 %, durante los últimos seis años. La Tabla 1.8 muestra el porcentaje que corresponde a cada sector en relación a las ventas anuales [20]. Es importante mencionar que en estas cifras no se considera la energía eléctrica que generaba la Compañía de Luz y fuerza del Centro.

El sector doméstico ha tenido el mayor crecimiento de demanda energética en parte debido al crecimiento poblacional y las prácticas de consumo que no consideran de manera sistemática el ahorro de energía. La producción de la energía eléctrica es cada día más costosa y el impacto ambiental que se produce para su generación es cada vez más notorio. Ahorrar en el consumo de este energético para atenuar su impacto en la economía familiar y en el ambiente resulta relativamente sencillo [19], lo importante es aplicar prácticas de consumo y ahorro de energía adecuados.

Tabla 1.8: Historial del porcentaje correspondiente a cada sector (%).

Sector	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009*
Doméstico	87.82	87.86	87.89	87.95	87.99	88.09	88.15
Agrícola	0.47	0.46	0.45	0.45	0.44	0.43	0.43
Industrial	0.65	0.68	0.72	0.75	0.78	0.79	0.81
Comercial	10.39	10.33	10.28	10.19	10.17	10.06	9.99
Servicios	0.66	0.66	0.66	0.66	0.62	0.62	0.63

\*Cifras a septiembre de 2009

El consumo de electricidad que se emplea para acondicionar casas habitación tiene impactos considerables a todos niveles. Para los usuarios que hacen uso de equipos eléctricos para este propósito, los altos consumos representan un impacto muy importante en sus gastos, llegando a representar hasta 20 % de los ingresos familiares en algunos sectores de la población. Para la empresa que provee la energía eléctrica el uso indiscriminado del aire acondicionado implica demandas al sistema que en ocasiones resultan difíciles de satisfacer porque las demandas de energía ocurren al mismo tiempo que la demanda máxima del sistema [18, 24]

Una vivienda eficiente es aquella que tiene un mayor aprovechamiento de los recursos energéticos en comparación con una vivienda convencional, lo que hace la más confortable para sus habitantes y genera un beneficio económico que contribuye al desarrollo integral de las familias. La iniciativa de tener viviendas eficientes ha consistido en introducir alternativas que reduzcan el consumo eléctrico con el uso de lámparas fluorescentes, cambio de refrigeradores viejos por nuevos y, para el caso de clima cálido, el uso de aislantes térmicos. En la Figura 1.12 se muestra el consumo promedio de una casa habitación para clima templado y para clima cálido [25]. El consumo de energía eléctrica también está relacionado con hora del día, las actividades económicas y las estaciones del año. En la Figura 1.13 se muestran las curvas típicas de carga de la región norte del país correspondientes a días hábiles y no laborables, para invierno y verano de 2007. En ellas se muestra la magnitud relativa de las cargas horarias respecto a la demanda máxima anual de potencia. Los perfiles de carga dependen de la región geográfica, estación del año y actividad económica [19].

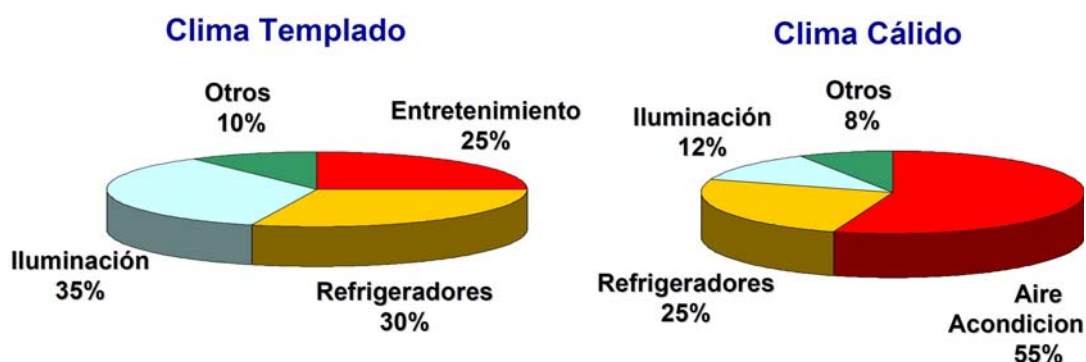


Figura 1.12: Distribución de consumo de energía en el hogar. Información publicada por CFE en abril 2006

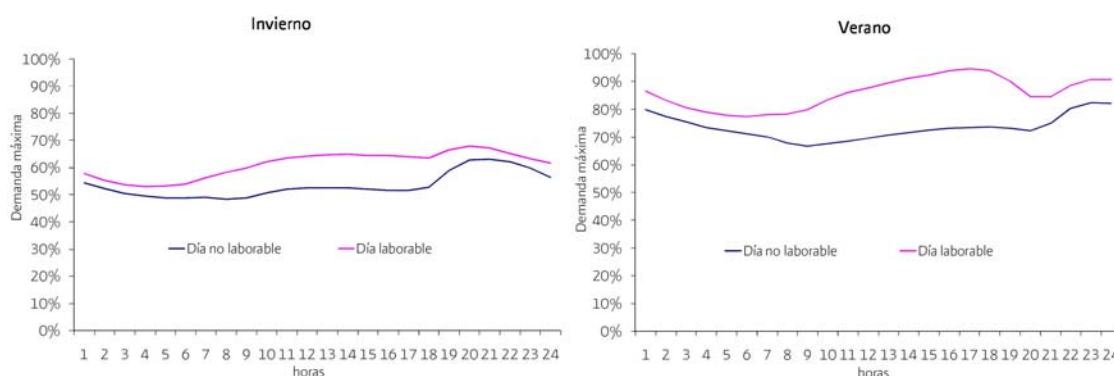


Figura 1.13: Curvas típicas de carga horaria respecto a la demanda máxima. Áreas operativas del Norte de México en 2007 (promedio de las áreas Norte, Noroeste y Noreste) [19].

### 1.6.1. Crecimiento poblacional

En 1950 el país tenía 25 millones de habitantes, para 1970 la población ascendía al doble, y en 2000, cuatro veces más. Aunque el incremento ha sido considerable, no fue homogéneo dentro del territorio. En términos generales, ha habido una gran diferencia entre el crecimiento rural y el urbano [14].

Actualmente la mayoría de la población mexicana vive en zonas climáticas muy templadas donde el uso de calefacción o enfriamiento no es prioridad para la población. Sin embargo, recientemente se ha presentado un crecimiento poblacional rápido en áreas cálidas y secas del norte de México y en las áreas del sur cálidas y húmedas. Este crecimiento está produciendo grandes incrementos en la demanda

eléctrica para acondicionamiento de aire. Por otra parte, los precios de la electricidad están convirtiéndose en un problema de accesibilidad para estas comunidades. La tasa media de crecimiento anual del consumo de energía eléctrica de 1997 a 2007 fue de 3.3 %, impulsado principalmente por las tasas de crecimiento anual en el consumo de la región Sur-Sureste con 4.2 % y Noroeste con 4.1 %, como puede verse en la Tabla 1.9 [18].

Tabla 1.9: Consumo total por región entre 1997 y 2007 en GWh.

Año	Región					Total
	Sur-Sureste	Centro	C-Occidente	Noreste	Noroeste	
1997	17,617	35,080	28,926	31,658	16,901	130,254
1998	18,574	36,611	30,763	33,961	17,230	137,209
1999	18,970	38,239	32,801	36,404	18,505	144,996
2000	20,160	40,733	35,192	39,236	19,949	155,349
2001	20,744	40,933	34,909	39,989	20,480	157,204
2002	22,046	41,280	35,570	40,863	20,354	160,203
2003	22,582	40,969	36,242	39,235	21,270	160,384
2004	23,227	41,006	37,451	39,421	22,310	163,509
2005	24,294	42,111	38,843	41,221	23,195	169,757
2006	25,289	42,548	40,249	42,843	24,345	175,274
2007	26,512	43,350	41,708	43,644	35,145	180,469
tmca( %)	4.2	2.1	3.7	3.3	4.1	3.3

tmca: tasa media de crecimiento anual.

Fuente: Comisión Federal de Electricidad

En la Figura 1.14 se muestra cada una de las regiones con la participación porcentual promedio que cada entidad federativa tiene en las ventas de energía de la región. En orden descendente en el consumo de energía eléctrica, las entidades con mayor participación fueron: Estado de México, Nuevo León, Distrito Federal, Jalisco, Veracruz y Sonora [19].

Por otra parte, en la Tabla 1.10 se puede apreciar el número de usuarios por entidad federativa así como las ventas que se realizaron en el mes de septiembre de 2009. Las regiones que demandaron mayor consumo la encabezan la Noreste (compuesta por cinco estados) con 28.58 % y Centro-occidente (nueve estados) con 28.58 % [20].



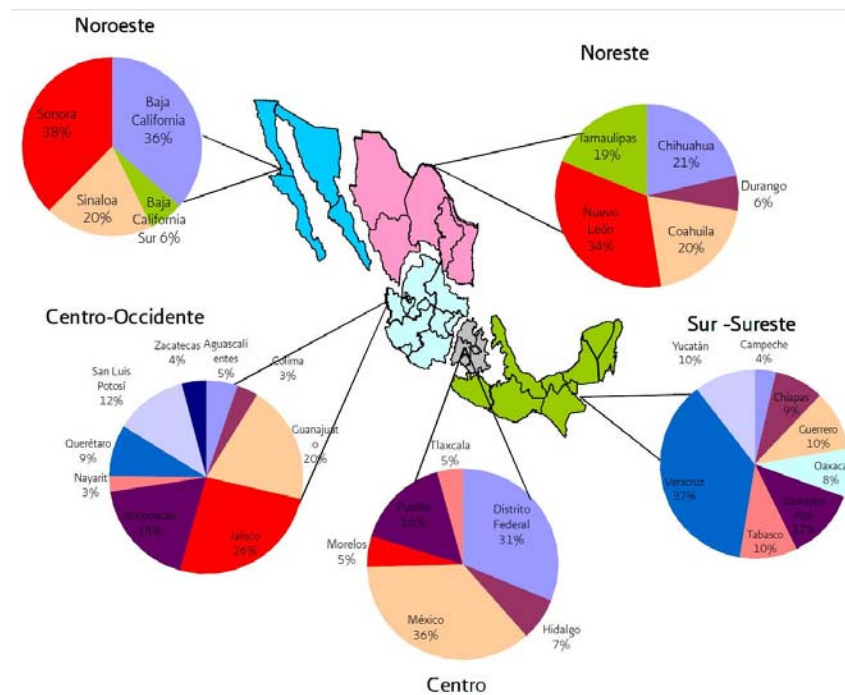


Figura 1.14: Participación en el consumo promedio anual de energía eléctrica por región y estado [19].

## 1.7. El acondicionamiento de aire y el consumo energético

Como se ha visto en las secciones anteriores, lograr la sensación de confort de los habitantes de un recinto requiere mantener las condiciones de humedad y temperatura en un rango que facilite al máximo las actividades biológicas dando oportunidad al desarrollo de actividades productivas de manera eficiente. Para lograr esa meta es necesario que las condiciones del recinto no cambien, independientemente de las condiciones ambientales externas y de las actividades internas. Esto se puede lograr mediante la remoción o adición de calor y humedad del sitio a través de sistemas de acondicionamiento de aire que demandarán energía eléctrica para su operación. Lo relevante en este punto es que la energía eléctrica demandada por el sistema de acondicionamiento de aire disminuye cuando se le exige menor cantidad de trabajo. De esta forma un punto clave para disminuir el consumo de energía



Tabla 1.10: Usuarios y consumo de energía eléctrica por entidad federativa en Septiembre de 2009 [20].

Región	Estados	Usuarios		Ventas (MWh)		Ventas por Región (%)
Noroeste	B.California	1,057,596	3.95 %	4,947,831	5.82 %	15.92 %
	B.California Sur	223,299	0.83 %	965,622	1.14 %	
	Sinaloa	893,355	3.33 %	2,775,617	3.27 %	
	Sonora	907,290	3.39 %	4,838,347	5.69 %	
Noreste	Coahuila	831,325	3.10 %	4,776,742	5.62 %	28.58 %
	Chihuahua	1,126,164	4.20 %	5,119,991	6.02 %	
	Durango	474,062	1.77 %	1,516,898	1.78 %	
	Nuevo León	1,473,657	5.50 %	8,400,645	9.88 %	
	Tamaulipas	1,156,453	4.31 %	4,478,914	5.27 %	
	Aguascalientes	374,400	1.40 %	1,236,736	1.46 %	
	Colima	243,395	0.91 %	874,530	1.03 %	
Centro-Occidente	Guanajuato	1,604,531	5.99 %	5,299,853	6.24 %	28.04 %
	Jalisco	2,324,784	8.67 %	6,434,695	7.57 %	
	Michoacán	1,461,178	5.45 %	3,431,143	4.04 %	
	Nayarit	373,291	1.39 %	677,000	0.80 %	
	Querétaro	530,160	1.98 %	2,069,312	2.43 %	
	San Luis Potosí	775,060	2.89 %	2,707,975	3.19 %	
	Zacatecas	505,061	1.88 %	1,100,718	1.30 %	
Centro	Hidalgo	238,701	0.89 %	346,290	0.41 %	8.87 %
	México	440,683	1.64 %	1,397,817	1.64 %	
	Morelos	458,068	1.71 %	1,036,455	1.22 %	
	Puebla	1,613,301	6.02 %	3,819,128	4.49 %	
	Tlaxcala	319,078	1.19 %	942,710	1.11 %	
Sur-Sureste	Guerrero	898,579	3.35 %	1,546,974	1.82 %	18.59 %
	Veracruz	2,251,936	8.40 %	5,465,982	6.43 %	
	Chiapas	1,218,311	4.55 %	1,445,299	1.70 %	
	Oaxaca	1,124,179	4.19 %	1,402,636	1.65 %	
	Tabasco	615,708	2.30 %	1,628,096	1.92 %	
	Campeche	236,610	0.88 %	612,090	0.72 %	
	Quintana Roo	428,931	1.60 %	2,001,687	2.36 %	
	Yucatán	622,551	2.32 %	1,695,389	1.99 %	
<b>Total</b>		<b>26,801,697</b>	<b>100.00 %</b>	<b>84,993,120</b>	<b>100.00 %</b>	<b>100.00 %</b>

eléctrica de los sistemas de acondicionamiento de aire consiste en la reducci6n de la carga térmica del recinto.

Para llevar a cabo el cálculo de la carga térmica de una casa habitación se deben de tomar en cuenta muchos factores. En la Figura 1.15 se muestran los mecanismos que interactúan dinámicamente dentro y fuera del edificio definiendo de manera conjunta

la carga térmica a la que estará sujeto el recinto, cantidad que está relacionada con la demanda energética que presentará el sistema de acondicionamiento de aire para mantener las condiciones de confort. Todos los elementos que se muestran en la Figura definen el comportamiento higrotérmico del recinto y están relacionados con las características termofísicas de la envolvente del espacio, i.e. paredes, techos, pisos y ventanas [27].

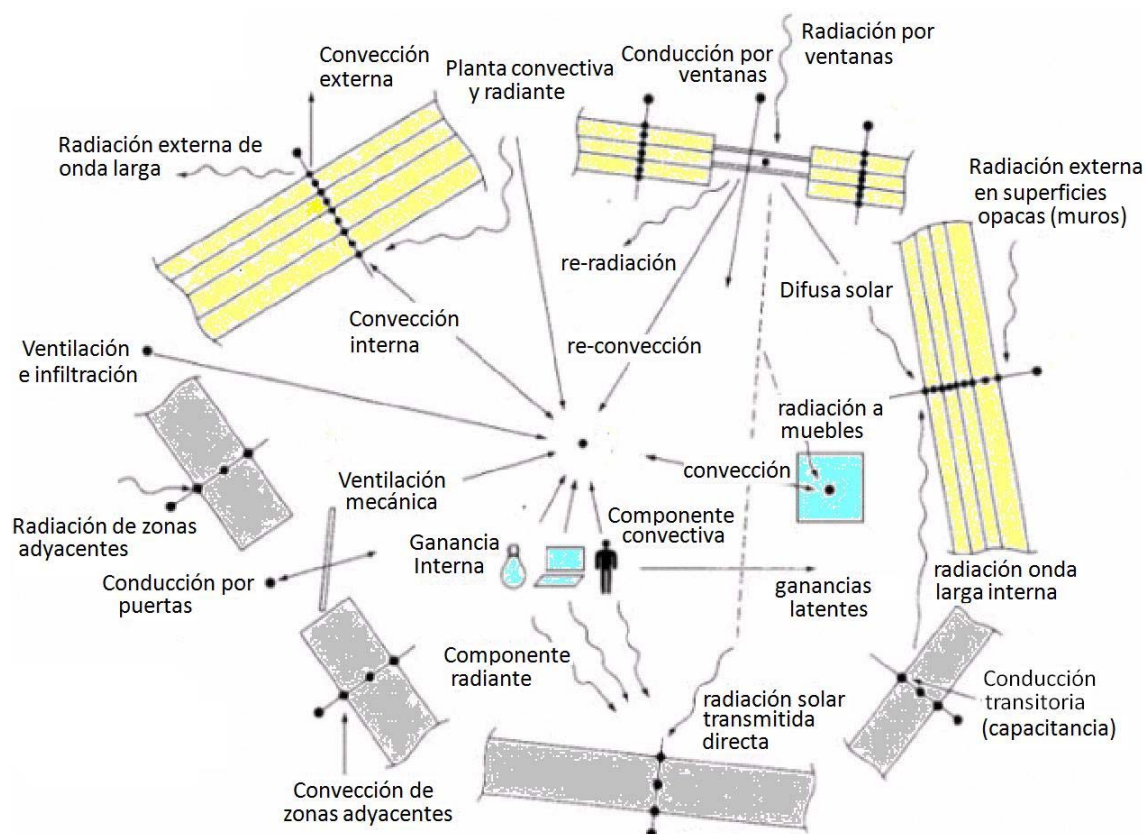


Figura 1.15: Efectos que modifican el comportamiento higrotérmico en el interior de una casa habitación

La ganancia de calor por efecto solar está entre las cargas térmicas más importantes para una edificación. La ganancia solar se convierte en una carga térmica en el edificio a través de dos mecanismos: Radiación directa y convección del medio ambiente. Esta última es un efecto indirecto del sol que primeramente calienta el entorno por radiación, además, y el aire atmosférico cercano a la superficie de la tierra transporta energía con su movimiento y por convección con la superficie externa de

la edificación transfiere energía al edificio conduciendo a cambios de la temperatura en el interior.

En una superficie opaca la radiación que no se refleja se absorbe, aumentando la temperatura de la estructura hasta un nivel tal que por la parte interna se empieza a transferir energía por convección al aire interior. El calor transferido representa la carga térmica instantánea debida a la pared. La radiación directa sobre las ventanas tiene además del componente de absorción, la transmisión directa de radiación, que a su vez impacta sobre una superficie interna elevando eventualmente su temperatura y generando así carga térmica instantánea.

Otros aspectos que producen carga térmica incluyen a la infiltración y ventilación. El aire que ingresa o abandona el recinto, transporta calor latente y calor sensible. En el interior del recinto existe también transferencia de calor y humedad entre zonas internas. La carga térmica del recinto también incluye a la interrelación de radiación de onda larga entre los elementos internos, las cargas internas latentes y sensibles, y la radiación de onda larga del edificio a sus alrededores o al espacio nocturno. Se puede visualizar al sistema compuesto por medio ambiente externo, el recinto y el medio interno como una red de resistencias y capacitancias térmicas, que varían con el tiempo, y están sujetas a potenciales térmicos también variables en el tiempo. El resultado global es la presencia flujos de calor entre los elementos del edificio, el medio ambiente exterior y el medio interno.

El sistema compuesto por todos los elementos de la construcción, los objetos dentro del recinto, las ventanas, los componentes del sistema de acondicionamiento de aire y el medio externo, pueden ser vistos como puntos nodales a los que se les asocia una capacitancia o capacidad térmica, y cuyas interacciones energéticas o flujos de calor están asociados con su condición higrotérmica. A estos nodos están asociadas las variables de interés como la temperatura, la humedad relativa y los flujos de calor sensible y latente.

## 1.8. Planteamiento del problema

La problemática que enfrenta el país con la escasez de energéticos se ve agravada con el crecimiento de población principalmente en la región noreste. El consumo de energía eléctrica aumenta con rapidez, especialmente en el sector doméstico. En la

---

región del norte del país el sector doméstico destina hasta el 55 % de su consumo de energía eléctrica en la operación de sistemas de acondicionamiento de aire.

Este consumo tan alto en los sistemas de aire acondicionado se debe en gran medida a que la mayoría de las casas habitación actualmente no están adecuadamente preparadas para operar en climas extremos como los que se presentan en regiones cálidas. Las situaciones más complicadas ocurren en verano e invierno. Las condiciones de confort sólo pueden ser alcanzadas con el uso de sistemas de acondicionamiento de aire, pero esto representa un consumo energético muy alto. El impacto ambiental y las condiciones socio económicas actuales son aspectos que limitan el uso indiscriminado de energéticos.

Se sabe que el uso de aislamientos térmicos favorece la reducción de la energía consumida por los sistemas de acondicionamiento de aire. Sin embargo, el uso de estos aislantes también representa una inversión que en ocasiones el sector doméstico no está en condiciones de pagar. Por esa razón resulta importante conocer de forma cuantitativa los beneficios que se pueden alcanzar con el uso de los aislamientos térmicos en zonas específicas de la casa habitación. El uso de otros recursos como las ventanas con filtros solares y de doble cristal generan una oportunidad extra para la reducción en el consumo energético.

El presente trabajo está orientado al desarrollo de una metodología que permita encontrar la solución más adecuada, mediante el uso óptimo de aislamiento térmico, para la reducción del consumo de energía de los sistemas de acondicionamiento de aire. El uso óptimo de los aislamientos térmicos está definido en términos de los beneficios que genera, es decir, es conveniente identificar cuales son los elementos de la envolvente que al aislarse térmicamente producen los mejores beneficios. La solución propuesta debe considerar los aspectos más relevantes que determinan el comportamiento de la casa habitación en condiciones de confort bajo condiciones climáticas variables y para una amplia variedad de materiales y tipos de construcción.

---

---

## CAPÍTULO 2

# METODOLOGÍA

---

El análisis de la carga térmica de una casa habitación comprende una amplia variedad de factores, como se ha comentado en el Capítulo 1. La ganancia de calor obtenida a través de las fronteras (envolvente) de una casa tales como muros, techos y ventanas afecta de forma considerable la carga térmica. Adicionalmente, otros aspectos como la infiltración y la generación de calor en el interior del recinto también afectan en el valor de la carga térmica del sitio. Estos últimos efectos sin embargo, dependen del tipo de actividad que se desarrolle en el recinto y de las costumbres de los habitantes.

La metodología que se propone en esta tesis es resultado de la evaluación de los principales aspectos a considerar en el comportamiento térmico en el interior del recinto. En virtud de que las cargas térmicas de mayor importancia de las casas habitación corresponden a las que se producen debido a las condiciones ambientales, resulta entonces de especial importancia la estimación del flujo de calor a través de la envolvente de la casa. Los aspectos de la generación de carga térmica que incluyen entre otros al calor de la cocina, iluminación, aparatos eléctricos y electrónicos, y el que se produce por los propios habitantes del lugar no son considerados en este trabajo.

Los aspectos que influyen en las cargas térmicas a través de la envolvente que por su relevancia son considerados en este análisis son:

1. Localización de la casa

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, es de suma importancia conocer la ubicación regional de la casa, ya que las condiciones climáticas de la región

determinarán el comportamiento de la casa. De igual forma, conocer la latitud y longitud determina la incidencia del sol sobre las paredes y techos de la casa.

## 2. Orientación cartográfica de la casa

La orientación de la casa tiene relación con la dirección que toma el sol a lo largo del día. Por ejemplo, si un muro de gran tamaño se encuentra expuesto con orientación al este u oeste; existirá un área muy importante para la incidencia de radiación solar. Una vez conocida la posición y orientación de la casa de estudio, es posible simular la posición del aislamiento, y predecir las ganancias de calor a través de sus fronteras.

## 3. Posición de la casa respecto a otras casas

Es necesario establecer la posición en la que se encuentra la casa. En un colonia existen casas que están rodeadas por otras casas, como se ve en la Figura 2.1-b o simplemente se encuentran en una esquina. Este punto es importante debido a que considera las sombras que se pueden generar sobre las paredes, de tal manera que se reduce la radiación directa sobre la envolvente de la vivienda.

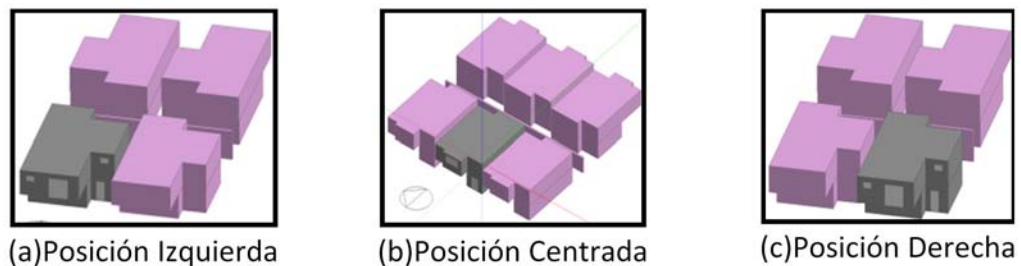


Figura 2.1: Opciones para la posición de la casa que se consideran en este estudio.

## 4. Diseño y materiales de construcción

Este punto se refiere a la forma geométrica del diseño y a la distribución de los materiales que se emplearon en la construcción de la casa. Dependiendo de su diseño geométrico la casa está expuesta a radiación solar y convección de calor desde el ambiente. Además, por lo general los materiales utilizados en techos no son los mismos que los empleados en las paredes por lo que se deben identificar por separado.

- Techo. Esta área es una de las más afectadas por la radiación solar. Los materiales evaluados en este trabajo son concreto, vigueta y bovedilla (barro block, poliestireno expandido).
- Muros. Generalmente, es el elemento de la envolvente de mayor área y es de primordial importancia en el estudio de la carga térmica. En este trabajo se estudiaron materiales como block, ladrillos, concreto y distintas combinaciones de concreto-aislante.

En el área de los muros también influye el número de puertas y ventanas que en ellos existen. Los materiales de estas aberturas en los muros llegan a ser importantes para el cálculo y pueden modificar el flujo de calor. Además, existe una diferencia importante dependiendo si el marco de éstos es de aluminio o de algún polímero. En el caso de las ventanas es necesario identificar el número de cristales que la componen y si algún cristal cuenta con la aplicación de filtro solar.

5. Valor de la resistencia térmica equivalente de cada elemento de la envolvente.

Una vez que se han identificado los materiales con los que se construyó la casa, se procede a calcular el valor de la resistencia térmica equivalente,  $R$ , de cada elemento de la envolvente. El valor  $R$  es la capacidad resistiva que presenta el elemento constructivo al paso del calor. Cuanto mayor sea el valor  $R$  menor será la transferencia de calor para la misma diferencia de temperatura. Adicionalmente, cuanto mayor sea la capacidad térmica mayor es la cantidad de energía que requiere el sistema para modificar su condición térmica, es decir, las condiciones al interior son mucho más estables.

6. Geometría de la casa.

El tamaño y la forma en que este construida la casa es de gran relevancia. La posición y tamaño de ventanas, puertas, muros y techos determinarán de forma conjunta la resistencia térmica de cada elemento y las ganancias de calor de a través de éstos. Desde luego, el tamaño de la casa define la capacidad térmica, es decir, la rapidez de respuesta dinámica a las cargas térmicas.

---

Una vez que se han estimado los efectos de todos los aspectos relevantes en el comportamiento del recinto, es posible llevar a cabo un análisis dinámico de la respuesta de la casa habitación ante las cargas térmicas correspondientes a los distintos elementos de la envolvente, y la demanda de energía que requiere el sistema de acondicionamiento de aire para mantener las condiciones de confort en el interior de la casa habitación.

La interacción entre la casa habitación y el medio ambiente es muy complicada debido a la cantidad de variables que participan y a la característica transitoria que tienen las condiciones ambientales. El balance de calor y masa resultante del análisis dinámico del recinto se puede resolver mediante métodos numéricos y con ayuda computacional. La propuesta consiste entonces en llevar a cabo la simulación computacional del comportamiento de la casa en periodos de tiempo de interés. El objeto es desarrollar opciones y soluciones, mediante el uso de aislamientos térmicos, para la disminución del consumo de energía eléctrica de los sistemas de acondicionamiento de aire de las casa habitación. Se plantea realizar:

- Simulación anual de una casa típica Con la recaudación de todos los datos de los puntos anteriores y con la ayuda de software comerciales como el Energy-Plus como herramienta, es posible realizar simulaciones del comportamiento térmico de las casa habitación en los que se considere el uso de sistemas de acondicionamiento de aire. Este análisis permite estimar el consumo de energía que se requiere para mantener las condiciones de confort en el recinto a lo largo de un año.
  - Generalización de resultados para casas típicas Es posible llevar a cabo una generalización de los resultados obtenidos mediante el uso de la metodología establecida en un diseño de experimentos que considere una amplia variedad de posibilidades de materiales de construcción, condiciones climatológicas, diseños de casas, orientaciones, ubicaciones y especialmente, el uso de aislamientos térmicos en muros, techos y puentes térmicos.
  - Generación de soluciones óptimas obtenidas con la metodología desarrollada aplicada a casa típicas. Se debe analizar toda la información recaudada en los puntos anteriores, especialmente los obtenidos en el análisis de generalización
-



de resultados para cuantificar las ventajas relacionadas con el ahorro de energía con el uso de aislamientos térmicos. Para este punto es conveniente integrar la evaluación del tiempo de recuperación de la inversión para ponderar las ventajas desde un punto de vista atractivo comercialmente.

## 2.1. Análisis de la transferencia de calor

El modelado del sistema es una de las etapas más importantes en el diseño y optimización de cualquier sistema térmico, en especial cuando tienen alto grado de complejidad como en el caso del análisis de flujos de energía en una edificación. La modelación numérica y simulación computacional son herramientas que permiten conocer el comportamiento y las características del sistema sin tener que construir el prototipo físico del problema [29].

El sistema *recinto-medio ambiente* se puede representar matemáticamente tomando en cuenta todos los elementos involucrados mediante un conjunto de ecuaciones y funciones matemáticas que expresen las relaciones entre las variables de entrada o flujos de excitación de cualquier índole (flujos másicos, radiación, temperatura exterior, humedad, horarios de ocupación, propiedades de los materiales involucrados, entre otros) con la respuesta del sistema en términos de cualquier otra variable que se desee controlar.

A través de la modelación se puede entender y predecir el comportamiento y las características de los sistemas térmicos. Una vez que se tiene un modelo, se le sujeta a una variedad de condiciones de operación y variaciones de diseño. Esto es de gran ayuda para comparar diseños alternos llegando a un sistema óptimo de acuerdo a lo que se desea en la salida de datos. La construcción de un modelo a partir de las leyes físicas involucradas en el sistema lleva a establecer las ecuaciones características del sistema.

En el caso del sistema térmico para un edificio es muy importante establecer cuidadosamente el modelo debido a la complejidad y diversidad de los flujos de energía involucrados, cuyo comportamiento está regido por ecuaciones diferenciales parciales con condiciones de frontera en estado transitorio, sistemas acoplados, geometrías complejas, y diversidad de propiedades de los materiales involucrados.

---

Los modelos teóricos o analíticos se basan en principios físicos reconocidos universalmente y demostrados o validados. Por otra parte, existen los modelos empíricos que generalmente emplean correlaciones obtenidas a partir del análisis de datos obtenidos de forma experimental, en donde el modelo tiene un rango de aplicación bien definido en el que se puede esperar una buena aproximación para la predicción de la respuesta de un sistema ante una excitación.

Una de las consideraciones más importantes en el modelado consiste en definir si el análisis del sistema se ha de realizar como un estado transitorio o un estado permanente, es decir, si se considera que las excitaciones y las respuestas del sistema son independientes del tiempo. En el caso específico del flujo de calor en un edificio, el comportamiento del sistema térmico se debe representar como un proceso transitorio, y en caso más simple como periódico.

Existen varios aspectos importantes que podrán ser incluidos al elegir a la simulación computacional como herramienta fundamental en el presente análisis:

1. Consideración transitoria de los factores que afectan a un edificio térmicamente, entre ellos el flujo de energía y los horarios de ocupación. Estos aspectos son variantes y casi siempre estocásticos.
  2. Facilidad en la cuantificación de los flujos de calor a través de cada uno de los elementos de la envolvente de la casa habitación.
  3. Facilidad para definir de las propiedades termofísicas de cada uno de los elementos que conforman la envolvente. Esto permite la consideración del uso de aislamientos térmicos en zonas muy específicas de la casa.
  4. Estimación del consumo de energía eléctrica por parte del sistema de acondicionamiento de aire que mantiene las condiciones de confort en el interior de la casa habitación.
  5. Estimación de la capacidad necesaria del sistema de acondicionamiento de aire
  6. Facilidad en la estimación de los costos y los beneficios basada en el comportamiento detallado del sistema bajo diferentes diseños.
-

Existen distintos niveles de análisis dependiendo de la complejidad de los modelos y agentes de excitación que se consideren. A través de la simulación se trata de emular en la medida de lo posible las interacciones reales de energía del recinto y su respuesta dinámica. Las consideraciones más realistas son más complicadas de analizar, por lo que habrá que tener en mente que no se trata de resolver los modelos más complicados, sino los que son suficientemente apegados a los intereses que perseguimos.

La evolución de las herramientas de diseño de cálculo y predicción de comportamiento térmico desde las manuales hasta las más modernas basadas en simuladores se muestran en la Tabla 2.1 [29]. Las simulaciones llevadas a cabo en la presente investigación fueron realizadas mediante el uso de dos programas de software. El primero de ellos es el ANSYS-FLUENT, que utiliza la herramienta conocida como dinámica de fluidos computacional. Este programa es muy robusto y tiene aplicaciones avanzadas para la simulación y el análisis de procesos termofluidodinámicos en áreas de la aerodinámica, hidrodinámica, transporte de calor y masa, combustión y propulsión. Este programa ha sido empleado en este trabajo para la evaluación de la resistencia térmica equivalente de elementos de la envolvente del recinto que están compuestos de varios materiales, elementos huecos con regiones llenas de aire, y geometrías complejas. El programa permite visualizar los contornos de temperatura en la región estudiada y facilita la evaluación del flujo de calor local. El segundo programa de software es el Energy-Plus que permite llevar a cabo la simulación del comportamiento de toda una casa y determina la respuesta dinámica y las cargas térmicas en cada uno de los elementos de la envolvente, además de la estimación de la energía consumida por el sistema de acondicionamiento de aire empleado para mantener temperaturas de confort en el interior.

### 2.1.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics, por sus siglas en inglés) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar fenómenos asociados al movimiento de los fluidos, transferencia de calor y masa, reacciones químicas, entre otros. Los problemas de conservación de cantidad de movimiento lineal, energía y especies,

---

Tabla 2.1: Evolución de herramientas de diseño de cálculo y predicción de cambios de energía en recintos cerrados.

Generación	Características	Comentarios
1	Métodos manuales de diseño, métodos simplificados y conocidos por el ingeniero practicante del ramo.	Fácil de usar, pero impreciso y de aplicaciones limitadas (uso de tablas factores de ganancias etc....)
2	Métodos manuales basados en teoría básica, con un poco de énfasis en la dinámica del edificio, pero aún simplificado en el tiempo.	Representan un poco mejor la realidad porque involucran más variables y flujos transitorios simplificados.
3	Metodología numérica con modelación integral interface gráfica con el usuario.	Representan mejor la realidad pero con ciertas simplificaciones
4	Buen acercamiento a la realidad, métodos computacionales y simuladores completamente dinámicos e integrales con todos los elementos del sistema energético del edificio.	Minimización de deficiencias, simuladores fáciles de usar e interpretar, predictivos y accesibles.

se formulan a través de ecuaciones diferenciales de la forma que se muestra en la Ecuación 2.1, donde  $\Gamma$  es el coeficiente de difusión,  $S$  es el término fuente. Los términos que aparecen en esta ecuación encuentran significado físico de acuerdo al fenómeno físico que se estudie y las características particulares que se consideren [30].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla \cdot (\rho u\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S \quad (2.1)$$

Para que un sistema de cómputo sea capaz de resolver las ecuaciones que describen el fenómeno a estudiar, éstas deben de ser transformadas en expresiones algebraicas que sólo contengan números, y que mediante algoritmos de cómputo encuentren solución. La transformación de las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, se llama proceso de discretización numérica. Hay varias técnicas de discretización, dependiendo de los principios en que se basen. Las más usadas son: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. El software comercial Fluent utiliza el método de los volúmenes finitos.

Fluent se desarrolló originalmente como una formulación especial de diferencias finitas. Este método es la base de varios códigos comerciales de dinámica de fluidos computacional (CFD). El método consiste básicamente de los siguientes pasos:

1. Integración de las ecuaciones de gobierno del flujo de fluido, sobre todo los volúmenes de control del dominio de solución.
2. La integración de las ecuaciones de gobierno lleva a la necesidad de evaluar los flujos, a través de toda la superficie que rodea a cada uno de los volúmenes de control, de masa, energía, cantidad de movimiento y especies.
3. Resulta entonces necesario aplicar algún tipo de aproximación como las diferencias finitas, para la evaluación de los flujos de convección y difusión, además de los términos fuente. Esto convierte a las ecuaciones integradas en un sistema de ecuaciones algebraicas.
4. Solución de las ecuaciones algebraicas mediante un método numérico.

En este trabajo en particular, el uso del programa Fluent estuvo principalmente enfocado en la solución de la ecuación de la energía válida para el caso de un material sólido. El objetivo estaba dirigido a la determinación de la resistencia térmica equivalente de los elementos de la envolvente de los que, por su geometría complicada o su condición multicomponente, no se tenía información. En el caso particular de los bloques huecos llenos de aire, se empleó el Fluent para determinar la transferencia de calor a través de éstos. En este último caso el asunto de la aerodinámica en el interior del bloque es inherente y tuvo que considerarse. Para llevar a cabo análisis con el programa Fluent se desarrollaron las siguientes etapas:

1. Diseño de la geometría.- La solución del problema comienza con el diseño de la geometría. Para ello es necesario disponer de un programa de CAD. En este trabajo, se ha optado por el uso del programa que Fluent tiene para ese propósito llamado Gambit. Se trata de un programa de CAD especialmente diseñado para preparar geometrías que se aplicarán en estudios de CFD y permite crear y exportar mallas, así como establecer las características de las condiciones de frontera.
-

2. Generación de la malla computacional. Es una etapa previa al cómputo en la que hay que cuidar que la densidad de la malla, es decir, el tamaño de los volúmenes de control. El tamaño de los volúmenes debe ser el adecuado para el tipo de problema que se desea resolver y la elección adecuada del tipo y tamaño de malla determina la exactitud de la solución. Conforme el tamaño de la malla sea menor, la solución del problema tiende a ser más exacta, pero el tiempo requerido para el cómputo es mayor.
3. Selección de las condiciones de frontera. En esta etapa se debe de colocar las condiciones de frontera y condiciones iniciales que definen el problema que se quiere resolver en lo particular. Finalmente, el Fluent resuelve un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales y transitorias, mismas que requieren de condiciones iniciales y de frontera adecuadas al problema físico de interés.
4. Solución numérica del problema. El programa resuelve mediante métodos numéricos las ecuaciones que modelan el sistema en estudio. La obtención de la solución numérica puede tomar unos cuantos minutos para problemas sencillos hasta varios días o incluso semanas dependiendo de la complejidad del problema y del equipo de cómputo con el que se cuente.
5. Post-procesamiento. Una vez que se tienen los resultados computacionales, es necesario trabajar los resultados numéricos para obtener la información de interés como los flujos de calor local, el calor total transferido en una cierta región de interés, el coeficiente de transferencia de calor por convección, la distribución de temperatura y la resistencia térmica equivalente.

### 2.1.2. Energy-Plus

Energy-Plus es una herramienta que se emplean para realizar la simulación computacional del comportamiento térmico de casas y edificaciones que son expuestas a condiciones ambientales variables. Mediante este programa es posible determinar el consumo de energía en edificios debido a los sistemas de acondicionamiento de aire, además de cuantificar la carga térmica que corresponde a cada uno de los elementos de la envolvente de la edificación. Fue desarrollada por el departamento de energía

---

de los Estados Unidos como incentivo de ahorro energético en la industria de la construcción, y está basado en los simuladores conocidos como DOE-2 y BLAST. El algoritmo de solución para la carga térmica en este software se realiza mediante una función de transferencia correspondiente a la Ec. 2.2 [31, 32].

$$C_a \frac{dT_a}{dT} = \sum_{i=1}^N Q_i + \sum_{i=1}^{N_{in}} h_i A_i (T_{si} - T_a) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} m_i C_p (T_{zi} - T_a) + m_{iex} C_p (T_0 - T_a) + Q_{sis}, \quad (2.2)$$

donde cada uno de los términos evalúa distintos aspectos involucrados en la transferencia de calor. Los aspectos considerados son:

- $C_a \frac{dT_a}{dT}$  : Cambio de la energía almacenada en el aire
- $\sum_{i=1}^N Q_i$  : Suma de las cargas térmicas internas
- $\sum_{i=1}^{N_{in}} h_i A_i (T_{si} - T_a)$  : Suma de las cargas térmicas por convección de todas las superficies internas de la zona
- $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} m_i C_p (T_{zi} - T_a)$  : Carga térmica debido al intercambio de aire entre dos ó más zonas
- $m_{iex} C_p (T_0 - T_a)$  : Carga térmica debida a la infiltración del aire externo
- $Q_{sis}$  : Calor de salida de la zona

El cambio de la energía en el aire dentro del recinto está relacionado a un cambio en su temperatura de bulbo seco. Entonces, la Ec. 2.2 relaciona la temperatura interna con la carga térmica debida a la transferencia de calor a través de todos los muros y ventanas en un edificio, las cargas de calor en el interior, la infiltración y la radiación solar. En general los términos de la Ec. 2.2 toman en consideración las formas fundamentales de la transferencia de calor: conducción, radiación y convección, desde y hacia el recinto.

### 2.1.3. Conducción de calor

Una de las formas más importantes de transferir energía hacia el interior de un edificio es la conducción a través de la envolvente que rodea al espacio acondicionado.

Esta envolvente está constituida por los muros, las ventanas, las puertas, los pisos y los techos. La transferencia de calor que fluye a través de estos elementos se puede modelar empleando la ley de Fourier mediante,

$$q'' = -k\nabla T, \quad (2.3)$$

donde  $q''$  es el vector del flujo de calor,  $k$  es la conductividad térmica y  $\nabla T$  es el gradiente de la temperatura definido como:

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z}\vec{k}, \quad (2.4)$$

donde  $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ , son los vectores unitarios en las direcciones  $x, y, z$ , respectivamente.

La Ec. 2.5 modela la difusión de calor en los medios sólidos. Esa ecuación se resuelve sujeta a las condiciones de frontera que definen la temperatura o el flujo de calor en las superficies del cuerpo del problema en particular del que se trate. La solución del problema es la distribución de la temperatura en el interior del cuerpo.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.5)$$

### Condiciones de frontera

La ecuación diferencial de difusión de calor es de segundo orden en el espacio por lo que se requieren dos condiciones de frontera por cada coordenada. En caso de tratarse además de un análisis transitorio sólo se necesita la condición inicial ya que la ecuación es de primer orden en el tiempo.

Existen tres tipos de condiciones de frontera que son típicamente empleadas:

1. Temperatura constante en la superficie. Condición de Dirichlet.

$$T(0, t) = T_s. \quad (2.6)$$

2. Flujo de calor constante en la superficie. Condición de Neumann.

- a) Flujo de calor finito

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q''_s. \quad (2.7)$$


---



b) Condición adiabática o aislada

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0. \quad (2.8)$$

3. Condición de convección en la superficie. Condición de Robinson.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = h [T_{\infty} - T(0)]. \quad (2.9)$$

La temperatura en una condición de conducción unidimensional en una pared plana es función únicamente de una coordenada. En caso de que se trate de estado permanente sin generación de calor la ecuación es:

$$\frac{d}{dx} \left( k \frac{dT}{dx} \right) = 0. \quad (2.10)$$

La ecuación anterior indica que en la conducción de calor unidimensional en una pared plana sin generación de calor el flujo de calor es constante a lo largo de la dirección del flujo.

La solución de la ecuación diferencial es

$$T(x) = C_1 x + C_2, \quad (2.11)$$

y aplicando como condiciones de frontera el caso que corresponde a temperaturas conocidas y constantes en cada superficie:

$$T(0) = T_{s1}, \quad (2.12)$$

$$T(L) = T_{s2}, \quad (2.13)$$

se tiene que

$$T(x) = (T_{s2} - T_{s1}) \frac{x}{L} + T_{s1}. \quad (2.14)$$

Es posible calcular el flujo de calor a través de la pared como

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} = \frac{k}{L} (T_{s1} - T_{s2}). \quad (2.15)$$

Entonces el calor transferido a través de una pared de área  $A$  es:

$$q_x = q_x'' A = \frac{kA}{L} (T_{s1} - T_{s2}). \quad (2.16)$$

Notar que el flujo de calor es constante, i.e. no depende de la coordenada  $x$ .

---

**Resistencia térmica equivalente  $R$** 

Observando el resultado anterior

$$q_x = \frac{kA}{L} (T_{s1} - T_{s2}), \quad (2.17)$$

podemos observar la analogía entre el calor y la corriente eléctrica. En la corriente  $I$  que fluye a través de una resistencia eléctrica  $R$  debida a un potencial eléctrico  $V$  está dada como:

$$I = \frac{V}{R}. \quad (2.18)$$

Considerando que la diferencia de temperatura es la que origina el flujo de calor a través de un cuerpo sólido, hacemos la analogía para escribir:

$$q_x = \frac{(T_{s1} - T_{s2})}{\frac{L}{kA}}. \quad (2.19)$$

Entonces podemos definir una resistencia térmica equivalente como:

$$R_{t,cond} = \frac{L}{kA}. \quad (2.20)$$

Por otra parte, empleando la ley de Newton del enfriamiento:

$$q = hA (T_s - T_\infty), \quad (2.21)$$

y empleando nuevamente la analogía vemos que:

$$q = \frac{(T_s - T_\infty)}{\frac{1}{hA}}. \quad (2.22)$$

Entonces es posible definir la resistencia térmica equivalente asociada con la convección como:

$$R_{t,conv} = \frac{1}{hA}. \quad (2.23)$$

Una pared puede estar formada por varias capas de distintos materiales y en ese caso también es adecuado el empleo de concepto de resistencia térmica equivalente a través del mismo análisis unidimensional. Ese análisis se realiza como un sistema compuesto por varias resistencias térmicas en serie.

$$q_x = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 4})}{\sum R_t}, \quad (2.24)$$


---

donde  $(T_{\infty 1} - T_{\infty 4})$  es la diferencia global de temperatura.

Para analizar sistemas compuestos también es práctica común el uso del *Coefficiente Global de Transferencia de Calor*,  $U$ , definido como:

$$q_x = U A \Delta T, \quad (2.25)$$

donde  $\Delta T$  es la diferencia global de temperatura.

Es claro que el coeficiente global está relacionado con la resistencia térmica como:

$$U = \frac{1}{R_{tot} A}, \quad (2.26)$$

$$R_{tot} = \sum R_t = \frac{\Delta T}{q_x} = \frac{1}{U A}. \quad (2.27)$$

En general los cuerpos compuestos pueden ser analizados como sistemas unidimensionales que incluyen resistencias térmicas en serie y paralelo. En realidad estos problemas corresponden a sistemas bidimensionales, sin embargo, con frecuencia el análisis unidimensional es satisfactorio. Estrictamente, el análisis unidimensional se aplica bajo los siguientes supuestos:

- a) Las superficies normales a la dirección de flujo son isotérmicas
- b) Las superficies paralelas al flujo son adiabáticas.

El uso de los modelos unidimensionales no funcionan cuando existen cambios de material en la dirección perpendicular al flujo de calor, especialmente si se presentan cambios importantes en sus propiedades termofísicas [33], como ocurre en edificaciones reales. En ese caso es conveniente evaluar los flujos de calor por medio de análisis computacional. En este trabajo se ha utilizado el Fluent para resolver esas dificultades.

#### 2.1.4. Convección de calor

La convección en los edificios generalmente es forzada por su parte exterior debido a las corrientes de aire ambientales. Por la parte interna de los recintos se puede considerar convección natural. En ambos casos el calor transferido se estima de acuerdo a la siguiente ecuación

$$Q_{conv} = h A (T_1 - T_2), \quad (2.28)$$


---

donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección y  $T_1 - T_2$  es la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared.

El aspecto importante en este punto es que el valor de  $h$  depende de las características del flujo de aire adyacente a la pared. En el caso de las superficies extenas hay que emplear correlaciones para flujo forzado que en general dependen de la geometría de la superficie, de la velocidad del viento y de las propiedades termofísicas del aire. Para las superficies internas, las correlaciones de convección natural dependen, además de la geometría, de la diferencia de temperatura que existe entre la pared y el aire dentro del recinto.

Una correlación que con frecuencia se aplica para la convección natural y que en este caso es aplicable para la transferencia de calor en la superficie interna de las paredes [34] es

$$N_u = \frac{hH}{k} = 0.1 \left( \frac{g\beta H^3 \Delta T}{\nu\alpha} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.29)$$

donde

$h$  : Coeficiente de transferencia de calor por convección

$H$  : Altura de la pared

$k$  : Conductividad de la pared

$g$  : Aceleración de la gravedad

$\beta$  : Coeficiente de expansión volumétrica

$\nu$  : Viscosidad cinemática

$\alpha$  : Difusividad térmica de la pared

### 2.1.5. Radiación de calor

La radiación térmica es un mecanismo de transferencia de calor entre dos o más cuerpos a través de ondas electromagnéticas que no requieren de un medio continuo para propagarse. En el modelo de transferencia de calor por radiación se involucra la radiación solar y otras fuentes como la radiación de onda corta entre el edificio y el medio externo y la radiación de onda larga por la iluminación.

En particular, la radiación solar es uno de los mecanismos de transferencia de calor más importantes en edificios porque impone una condición térmica directa a la estructura. Además, depende de la hora del día y del día del año, y es modificada

---

por factores como la atmósfera terrestre, aerosoles de cualquier tipo la nubosidad y otros efectos que dispersen la luz.

De todas las formas de transferencia de calor, la radiación representa el intercambio de energía más importante sobre la superficie de una construcción. Dependiendo de la absorbancia externa de las paredes y techo, y de la transmitancia de las ventanas, puede llegar a representar hasta el 70 % de la ganancia total de calor [35].

Parte de la radiación solar que incide sobre las ventanas en un edificio se transmite como carga térmica. Esto depende de las propiedades ópticas del vidrio, entre ellas la transmitancia, la reflectancia y absorbancia, además del ángulo de incidencia sobre la superficie de la ventana.

## 2.2. Cargas térmicas a través de la envolvente del recinto

Es muy importante conocer las características y propiedades que definen el desempeño térmico de los materiales de construcción de los muros y techos, así como su forma de aplicación. De estos aspectos depende la capacidad resistiva de los elementos de la envolvente del recinto. Para llevar a cabo los análisis y las simulaciones se tomaron en cuenta las propiedades de los materiales que se muestran en la Tabla 2.2.

Existen materiales o combinaciones de materiales disponibles comercialmente para suministrar resistencia al flujo de calor de los elementos de las construcciones. Estos aislantes térmicos se caracterizan de acuerdo a la resistencia térmica que tienen. La capacidad de aislar térmicamente,  $R$ , se expresa en el sistema internacional en  $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ , y en unidades del sistema inglés en  $\text{ft}^2 \text{ hr}^\circ\text{F}/\text{BTU}$  [28]. A nivel comercial la nomenclatura que se utiliza para representar la capacidad del aislamiento se indica con una **R** seguida de un valor numérico que corresponde al valor de su resistencia térmica en el sistema inglés. Existen por ejemplo aislamientos térmicos identificados comercialmente como R5, R10, R13, entre otros. En la medida que el valor numérico es mayor, también es mayor la resistencia térmica del material.

---

Tabla 2.2: Listado de propiedades de los materiales utilizados en los análisis de los muros y techos de acuerdo a la referencia [36].

Material	Conductividad Térmica $k$ W/m K	Calor Específico $c_p$ kJ/kg K	Densidad kg/m <sup>3</sup>
Fibra de Vidrio	0.043	0.96	64
Poliestireno extruido (XPS)	0.02885	1.21	35
Concreto	1.3	1.00	2240
Block	1.1	0.92	2020
Ladrillo	0.71	0.79	1760
Tabla de Yeso	0.24	0.88	816
Mortero	0.92	0.79	1600
Madera	0.115	1.26	513
Poliestireno expandido (EPS)	0.046	1.40	10
Aire	0.0242	1.00	1.225

### 2.2.1. Transferencia de calor en techos

Los techos que están en contacto con el medio exterior son un punto ideal para iniciar con la evaluación de la transferencia de calor. Los techos son los elementos de la envolvente que tienen mayor exposición a la radiación solar y a la convección de calor. Los techos típicos de las construcciones en México están elaborados a base de placas de concreto o por sistemas de vigueta y bovedilla.

- Techos de concreto.- Las constructoras del país manejan distintos espesores, pero en esta tesis nos enfocaremos para un espesor de uso corriente de diez centímetros.
- Techo de vigueta y bovedilla.- Este tipo de construcción se compone de dos elementos, como se muestra en la Figura 2.2. La *Vigueta* es el elemento fundamental del sistema vigueta-bovedilla, ya que es la responsable de soportar el peso de la losa y las cargas sobre ella y de transmitir las la totalidad de las cargas a los cerramientos o trabes. La *Bovedilla* es un elemento ligero que sirve para aligerar la losa y a eliminar el uso de la cimbra. Las bovedillas no tienen ninguna función estructural. Comúnmente las bovedillas son de barro o poliestireno expandido (Expanded PolyStyrene, EPS) [37].

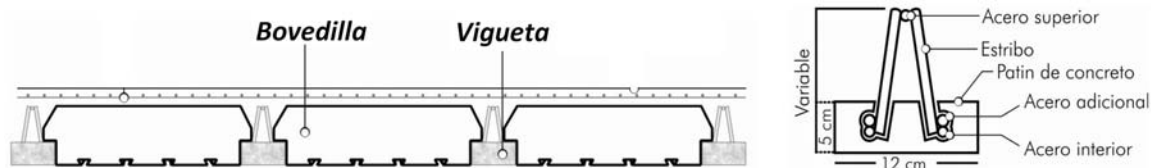


Figura 2.2: Sistema Vigüeta-Bovedilla. *a)* Esquema del sistema. *b)* Esquema de la estructura.

El diseño de experimentos empleado en el estudio de las cargas térmicas a través de los techos se esquematiza en la Figura 2.3. Se definen ocho casos distintos. Las consideraciones específicas para cada caso se detallan a continuación:

- A)** Techo de concreto de 10 cm de espesor y sin aislamiento térmico.
- B)** Techo de concreto de 10 cm de espesor, con aislamiento térmico R10 por la parte inferior (que corresponde a un aislamiento comercial de fibra de vidrio de 7.6 cm) y con un acabado interior de tabla de yeso de 1.3 cm de espesor.
- C)** Techo de concreto de 10 cm de espesor, con aislamiento por la parte inferior R30 (fibra de vidrio 24.1 cm) y una tabla de yeso de 1.3 cm.
- D)** Techo de vigüeta y bovedilla de EPS de 12 cm de espesor.
- E)** Techo de vigüeta y bovedilla de EPS de 13 cm de espesor.
- F)** Techo de vigüeta y bovedilla de EPS de 15 cm de espesor.
- G)** Techo de vigüeta y bovedilla de EPS de 12 cm de espesor, con aislamiento R5 de XPS en la parte inferior de la vigüeta. La Figura 2.4 muestra un esquema de este diseño.
- H)** Techo de vigüeta y bovedilla de EPS de 12 cm de espesor, con aislamiento R13 (fibra de vidrio 8.9 cm) en la parte inferior y una tabla de yeso de 1.3 cm.

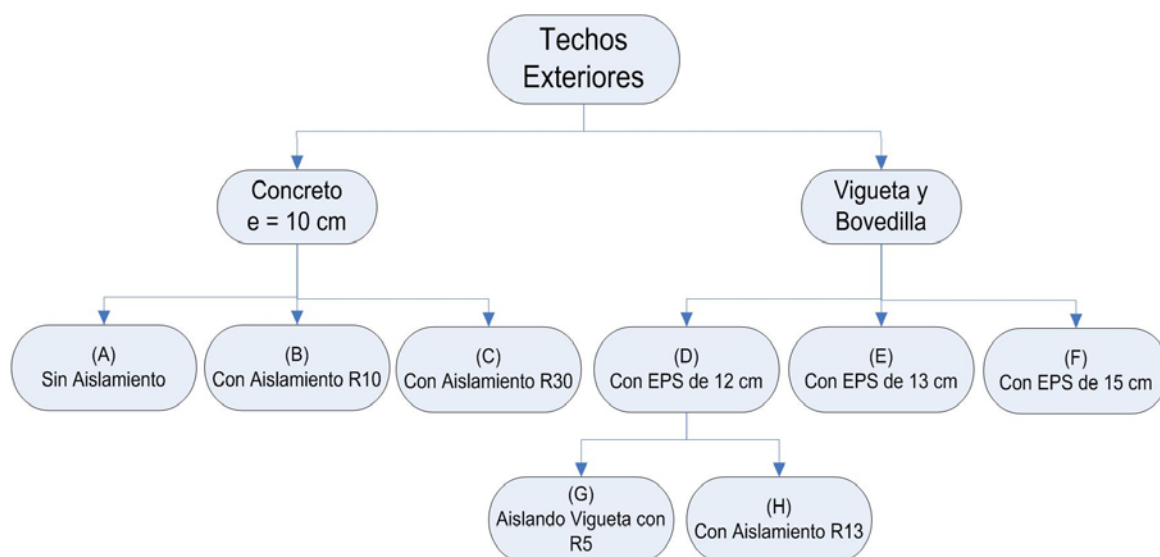


Figura 2.3: Diseño de experimentos empleado para el análisis de las cargas térmicas de los techos

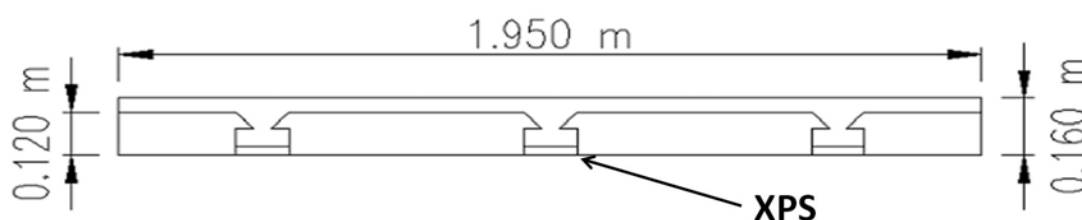


Figura 2.4: Esquema del caso **G** del análisis de las cargas térmicas en los techos.

### Consideraciones generales para el análisis

El análisis en esta etapa consideró el transporte de calor por conducción. El propósito específico fue determinar el valor de la resistencia térmica equivalente del sistema vigueta-bovedilla con distintos materiales y capacidades de aislamiento térmico. El estudio se realizó para una superficie de un metro cuadrado. Los análisis se llevaron a cabo con el software Fluent 6.2.16. Las condiciones de frontera en las paredes laterales (izquierda y derecha) se consideraron simétricas, lo que se traduce en un flujo de calor cero en los sitios que guardan simetría respecto a la vertical. Para las caras superior e inferior se supusieron temperaturas uniformes de 40°C y 25°C, respectivamente.



### 2.2.2. Transferencia de calor en muros

En la construcción de los muros se acostumbra utilizar una amplia variedad de materiales muchos de los cuales son para decoración o acabado. No obstante, por el interior del muro la mayoría de las construcciones son construidas a base de ladrillo, block o concreto. En esta tesis se estudió el comportamiento de muros sencillos conformados por ladrillos, block, concreto, yeso y mortero, que son de uso corriente. El diseño de experimentos para analizar la carga térmica a través de los muros expuestos al medio externo se muestra en la Figura 2.5.

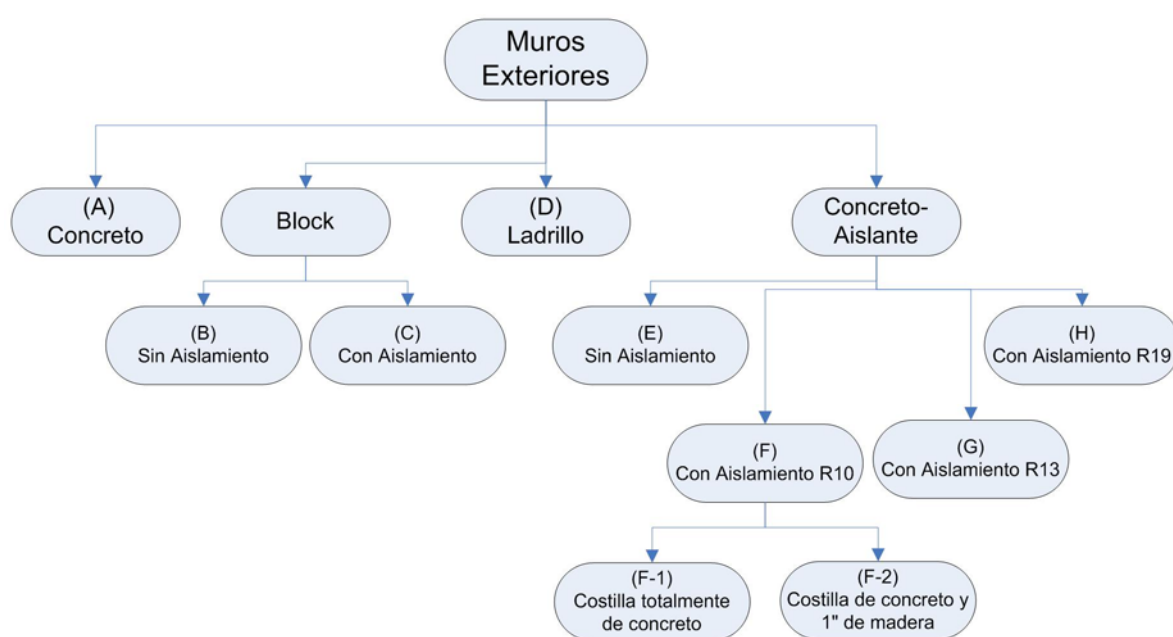


Figura 2.5: Diseño de experimento para muros exteriores.

Consideraciones específicas que incluyen las geométricas y descripción de cada caso se detallan a continuación.

- A)** Muro de concreto con un espesor de quince centímetros sin aislamiento térmico.
- B)** Muro de block hueco sin aislamiento térmico. Para este caso se construyó un modelo tridimensional en CAD como el que se muestra en la Figura 2.6. El modelo corresponde a una pared de 2.535 metros de altura. Se trabajó en el

modelado del flujo de convección natural en el interior de los bloques y se utilizó la condición de frontera “simetría” en la parte región media de la pared de block.

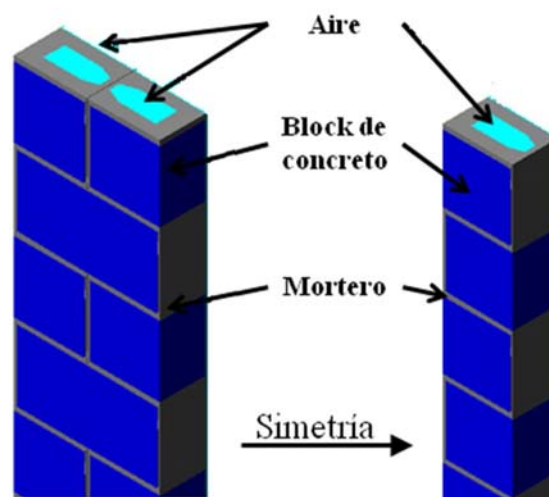


Figura 2.6: Modelo en CAD del muro construido de blocks en 3D que se utilizó en el análisis del caso **B**.

**C)** Muro de block relleno con aislamiento. Se utilizó el mismo modelo de CAD en 3D del caso **B**, pero en este análisis se consideró que las cavidades de los blocks están rellenas de fibra de vidrio comercial como aislante térmico.

**D)** Muro de ladrillo sin aislante térmico. Este caso en realidad es unidimensional de conducción de calor, sin embargo, para hacerlo más ilustrativo se estudió en dos dimensiones. Las dimensiones del ladrillo fueron  $26\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ . El muro analizado incluye un centímetro de mortero como acabado, semejante a un muro real.

**E)** Muro de “concreto-aislante” sin aislamiento. El muro se componía de una región de concreto con costillas, cavidades llenas de aire, tabla yeso, y uniones de una pulgada de espesor de XPS para romper el puente térmico originado por el concreto y la cubierta de tabla de yeso de 1.3 cm de espesor. La Figura 2.7 muestra un esquema de este caso. Este análisis se hizo en 3D debido a que las cavidades se consideraron llenas de aire.

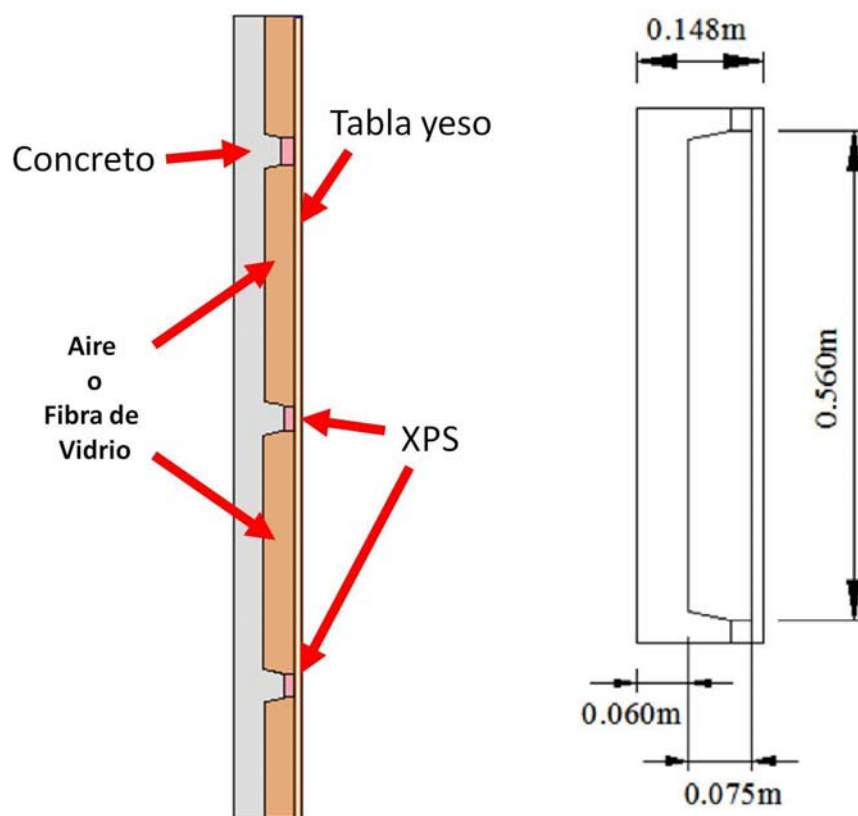


Figura 2.7: Esquema del modelo empelado en los casos **E** y **F**.

**F)** Muro de concreto-aislante con aislante R10. Se estudió de la misma forma que el caso **E**, pero la cavidad en esta ocasión no contiene aire sino un aislante de fibra de vidrio con un espesor 7.6 cm, y en la unión de la tabla de yeso con el concreto se encuentra una pulgada de XPS equivalente a R5. Las dimensiones son las ilustradas en la Figura 2.7.

Para el muro de concreto-aislante **F**, se desarrollaron dos subcasos. El objeto fue identificar la importancia de los puentes térmicos en este tipo de geometría.

**F-1)** Muro de concreto-aislante R10 con costilla totalmente de concreto.

**F-2)** Muro de concreto-aislante R10 con costilla de concreto y una pulgada de madera.

**G)** Muro de concreto-aislante R13. La cavidad tenía fibra de vidrio con un espesor de 8.9 cm y el XPS de 5.2 cm. Las demás dimensiones son iguales a las de la Figura 2.7.

**H)** Muro de concreto-aislante R19. La fibra de vidrio de este caso fue de 15.9 cm y el XPS de 9 cm de espesor.

**Consideraciones de simulación general.** Las análisis computacionales se llevaron a cabo con el software Fluent 6.2.16. Las condiciones de frontera en las paredes laterales se especificaron como superficies con temperatura uniforme exterior e interior de 40°C y 25°C, respectivamente. Las superficies inferior y superior se consideraron simétricas.

### 2.2.3. Puentes térmicos. Uniones entre muros y techos

Durante el estudio de las cargas térmicas en los muros y techos se identificaron zonas en las que se presentan puentes térmicos. Específicamente, en las uniones entre los muros internos y los techos externos, al igual que en las uniones entre los muros internos y los externos se presenta un efecto semejante al que ocurre en las aletas térmicas. La transferencia de calor entre el interior y el exterior del recinto mejora considerablemente debido a que la conducción en las uniones favorece el transporte del calor proveniente de las regiones expuestas a la convección y a la radiación. Las superficies con aletas son de uso común en la práctica para mejorar la transferencia de calor y a menudo incrementan varias veces la razón de esa transferencia [38]. Para reducir la carga térmica hacia el recinto se debe evitar el transporte de calor a través de este tipo de puentes térmicos. Para cuantificar la importancia de romper estos puentes se analizaron dos casos que típicamente aparecen en las edificaciones.

#### Unión entre un muro exterior y uno interior

Se estudiaron dos condiciones, la primera de ellas corresponde a la unión de un muro de concreto interno con uno externo, como se ilustra en la Figura 2.8. En la segunda condición los muros se separaron con una pulgada de XPS. La temperatura en el interior se consideró de 20° C con un coeficiente convectivo de 10 W/m<sup>2</sup> K, y en superficie exterior de 40°C con un coeficiente convectivo de 25 W/m<sup>2</sup> K.

---

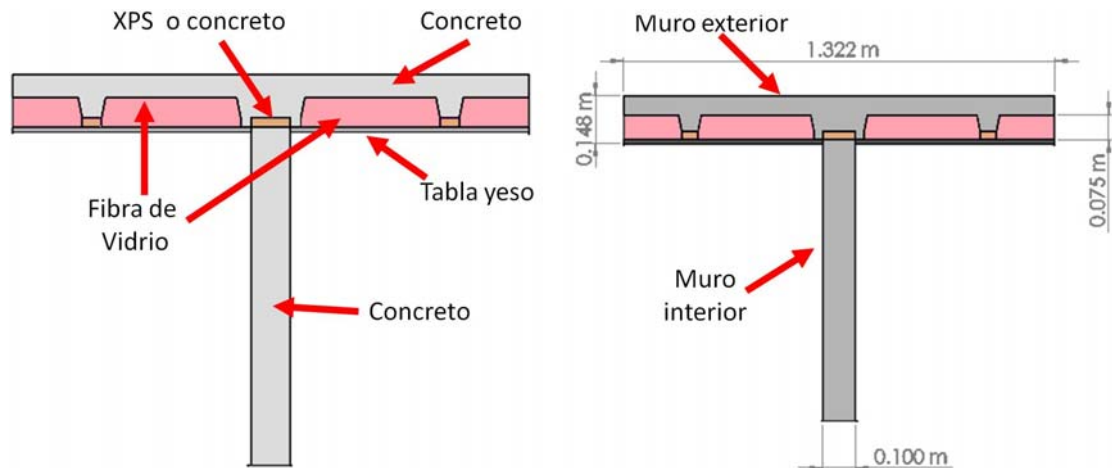


Figura 2.8: Esquema del sistema analizado para evaluar el efecto de los puentes térmicos en las uniones entre muros y techos.

### Unión del techo con la pared que separa a dos habitaciones

Se analizó el puente térmico que se presenta en la unión entre el techo y la pared que comparten dos habitaciones contiguas como se observa en la Figura 2.9. Se consideró que una de las habitaciones cuenta con un sistema de acondicionamiento de aire que conservaba el cuarto a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ , mientras el cuarto contiguo se encuentra a una temperatura de  $30^{\circ}\text{C}$ . Se supuso además que la temperatura de la superficie exterior era de  $45^{\circ}\text{C}$ . Para este análisis se consideró que los muros y techos de la casa fueron construidos en su totalidad de concreto con un espesor de 10 cm.

Para este análisis se estudiaron 7 casos distintos, mismos que se ilustran en la Figura 2.10. En el primero, llamado caso Techo, se estudió la ganancia de calor que tiene el cuarto refrigerado para las condiciones descritas anteriormente. En el segundo caso, identificado como caso 1, se cubrió el techo con una pulgada de aislante XPS con una longitud de 4 metros. En el denominado caso 2 se aumentó la longitud del aislante a 4.2 m, lo necesario para cubrir la parte del techo que comunica directamente con los muros interiores. Para los casos 3 al 6 se incrementó sucesivamente en 0.5 m la longitud del aislante en zona que cubre el techo del cuarto que no está refrigerado. Este análisis en particular está enfocado a evaluar la necesidad de aislar térmicamente la región del techo que se encuentra cerca del muro de una habitación refrigerada.

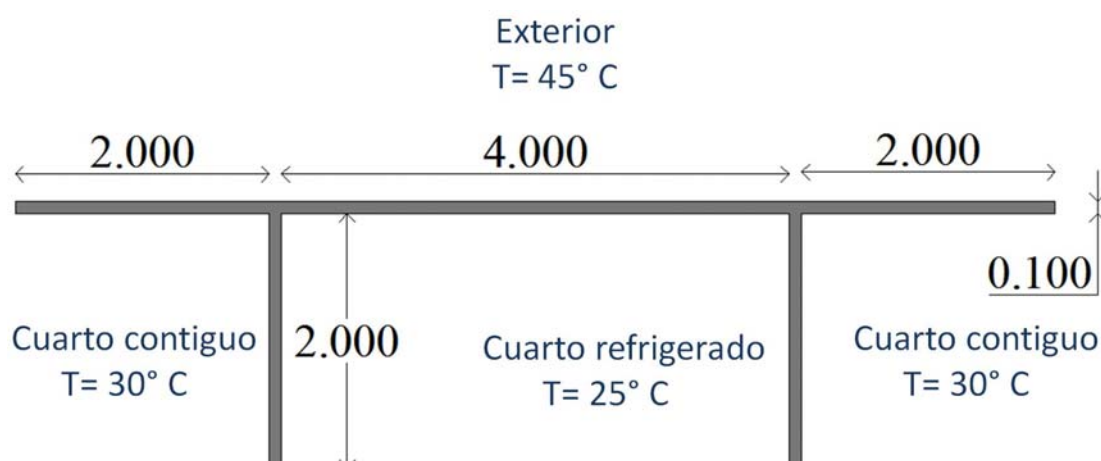


Figura 2.9: Esquema del sistema estudiado para evaluar el puente térmico entre el techo y el muro que comparten dos habitaciones que se encuentran a distintas temperaturas.

Esto ocurre por ejemplo en la cornisa de las casas o en la losa de un recinto no refrigerado como una cochera.

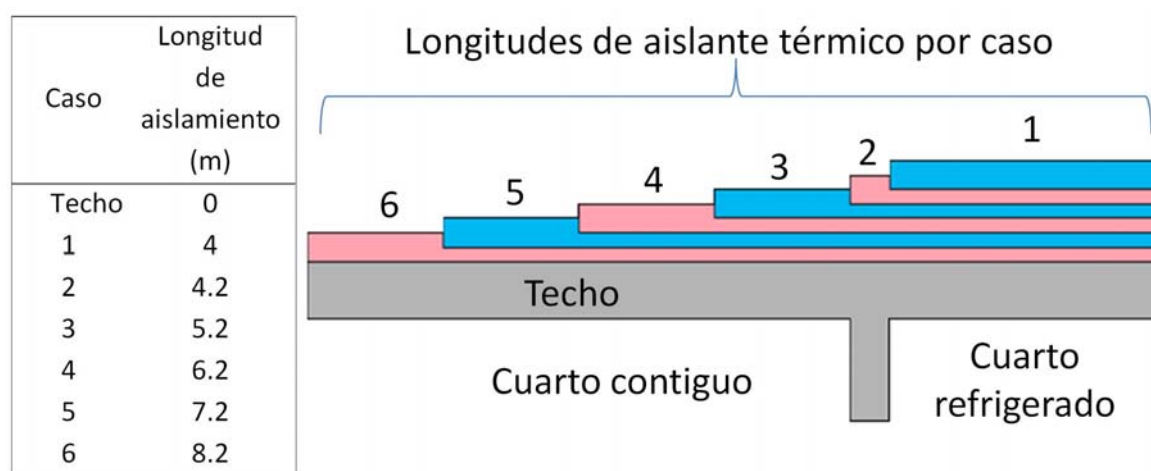


Figura 2.10: Casos estudiados para el análisis del puente térmico entre el techo y los muros.

### 2.2.4. Carga térmica a través de las ventanas

Las ventanas son aberturas en las paredes, cubiertas con materiales generalmente transparentes. Típicamente constan de un encristalado (vidrio o plástico) sencillo o múltiple con marcos y persianas. En la envolvente de una casa es la zona que ofrece la menor resistencia al flujo de calor. En una casa típica, cerca de un tercio de la pérdida total de calor en invierno ocurre a través de las ventanas, asimismo, la mayor parte de la infiltración de aire ocurre a través los bordes de éstas. La ganancia de calor solar a través de las ventanas es la responsable de gran parte de la carga térmica en el verano. Se puede minimizar la pérdida de calor en el invierno a través del uso de ventanas de hoja doble o triple que sean herméticas al aire, con películas o recubrimientos selectivos desde el punto de vista espectral, permitiendo así la entrada de tanta radiación solar como sea posible. Por otra parte, las ganancias de calor en el verano se pueden disminuir usando persianas internas o externas eficaces sobre las ventanas [39].

Durante la mayor parte del año el sol ocasiona un calentamiento importante en las viviendas y, en general, en cualquier tipo de recinto como oficina y tienda de conveniencia. Dicho calentamiento se intenta eliminar principalmente en los meses de verano. Este efecto tiene por consecuencia el incremento del consumo de energía eléctrica, debido al uso prolongado de los sistemas de aire acondicionado que permiten mantener condiciones de confort en los recintos citados.

Una solución a tal problema consiste en el uso de cierto tipo de cristales, o láminas sobre los cristales, que filtren los el espectro de la luz solar reduciendo el calentamiento.

En este trabajo se evaluó el beneficio que se obtiene con el uso de filtros comercialmente disponibles a través de la estimación de la ganancia térmica en acristalamientos simples. Para este análisis se construyó un modelo físico sencillo que permitió cuantificar el calentamiento que sufre un cuerpo expuesto a la radiación solar que atravieza un acristalamiento típico. De manera simultánea se evaluó la ganancia de calor que sufre el cuerpo cuando el acristalamiento cuenta con diferentes tipos de filtros solares.

La Figura 2.11 muestra un esquema del modelo físico, cuyas paredes fueron construidas con poliestireno extruido (XPS) con espesor de una pulgada para aislar

---

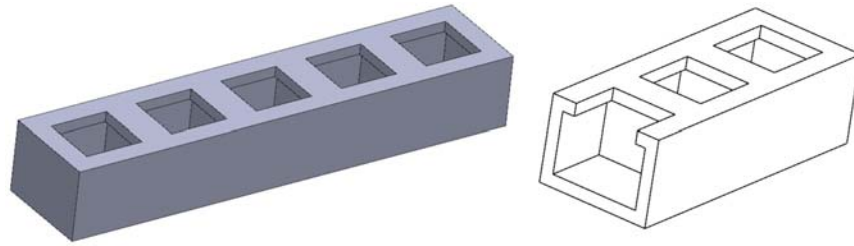


Figura 2.11: Modelo físico para la evaluación de la efectividad de distintos filtros solares.

térmicamente el cuerpo expuesto a la radiación solar. El modelo tiene una altura de 0.15 m, largo de 1.10 m y ancho de 0.23 m. Cuenta con 4 paredes del mismo material colocadas internamente de tal modo que existen cinco cámaras del mismo tamaño. Cada una de las cámaras tiene una ventana de vidrio de  $0.13\text{ m} \times 0.14\text{ m}$  de uso corriente de 6 mm de espesor.

Dentro de cada una de las cavidades se instaló una placa de aluminio con dimensiones  $43\text{ mm} \times 51\text{ mm} \times 0.15\text{ mm}$  pintada con un con esmalte color negro mate. El modelo físico se instrumentó con dieciséis termopares tipo *K* con una sensibilidad de  $41\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Cinco de los termopares se colocaron en la cara posterior de las placas de aluminio, cinco más se colocaron en las caras internas de los vidrios y otros cinco en las caras externas de los mismos. Se instaló además un termopar para medir la temperatura del ambiente exterior.

Gracias al diseño del modelo se pudieron evaluar cinco casos simultáneamente. En el primer caso se consideró solamente el vidrio (identificado como NF- No Filter). En el segundo caso el vidrio tenía una película de filtro solar comercial identificado como *FX*, y en los casos identificados como tres, cuatro y cinco, los vidrios tenían un filtros solares comerciales de la firma Hüper Optik, serie Ceramic de cedula 60, 40 y 20, respectivamente. En la Tabla 2.3 se presentan las características de los filtros solares utilizados.

La Figura 2.12 muestra la instrumentación que se usó en el modelo físico que consta básicamente de un sistema de adquisición de datos DAQ de la marca National Instruments (NI). En la Figura 2.13 se observa un acercamiento que muestra la placa de aluminio instrumentada para la medición de la ganancia de calor por radiación solar.



Tabla 2.3: Características de los filtros solares usados en el modelo físico.  
Comparativo entre Películas Reflectivas para Ventanales

	Hümper Optik					3M	
	Ceramic					Ultra PR	PR
	60	50	40	30	20	S70	70
Transmisión de luz visible %	60	52	42	30	21	67	69
Reflexión de luz visible %	9	12	9	11	14	10	9
Coefficiente de sombreado	0.67	0.58	0.52	0.43	0.37	0.57	0.58
Coefficiente de ganancia solar	0.58	0.5	0.45	0.37	0.32		
Transmisión solar total %	47	38	29	20	14		
Rechazo de infrarojos %	60	69	80	86	91	97	97
Luz ultravioleta rechazada %	99.9	99.9	99.9	99.9	99.9	99	99
Total de energía solar rechazada %	43	50	56	63	68	49	50
Reducción de resplandor %	34	45	53	62	76		



Figura 2.12: Modelo físico empleado para la evaluación de los filtros solares



Figura 2.13: Interior de una cavidad de la maqueta para la caracterización de filtros solares

Para llevar a cabo el registro de datos, se instaló el modelo en la azotea de un edificio para evitar el bloqueo de los rayos solares. Se tuvo especial cuidado para

colocar el modelo orientado correctamente respecto al sol, buscando siempre que los rayos solares sean perpendiculares a la superficie del vidrio.

Asimismo se buscó la forma de los rayos solares incidieran de forma simultánea sobre las placas instrumentadas en las distintas cavidades. Para ello, el modelo se cubrió con una placa de XPS, como muestra en la Figura 2.14. El experimento dio inicio al remover la cubierta.



Figura 2.14: Modelo físico antes del inicio de la prueba.

En la Figura 2.15 se observa la incidencia de los rayos solares sobre las placas de aluminio. Se verificó que no existiera alguna sombra que pudiera favorecer alguno de los casos en prueba.



Figura 2.15: Modelo físico durante la prueba.

El experimento se llevó a cabo en dos ocasiones de forma independiente. La primera bajo condiciones climáticas del medio día, aproximadamente a las 11:54 am, y la segunda considerando condiciones por la tarde, alrededor de la 1:38 pm.

---

## 2.3. Simulación de una casa típica

La importancia de estudiar los elementos de una edificación por separado radica en el poder entender, cuantificar e identificar áreas de mejora que permitan en la resistencia térmica de los elementos de una construcción. No obstante, es necesario agrupar a todos los elementos para obtener un resultado global del comportamiento del recinto. Además, el análisis debe incluir el aspecto transitorio de las condiciones ambientales y el efecto de la ubicación geográfica de la edificación. En otras palabras, hay que analizar la casa en el clima estocástico de todo un año para la región geográfica de interés. Para realizar el análisis globalizado se utilizó el programa llamado Energy Plus.

### 2.3.1. Estudio de una casa considerando la ubicación, orientación y el aislamiento

Para llevar a cabo el estudio del comportamiento global de una casa habitación se definieron distintas condiciones en las que se incluye la posición de la casa y su orientación. Para evaluar estos aspectos se estudió la vivienda de 85.8 m<sup>2</sup> que se presenta en la Figura 2.16-casa 3. La casa en cuestión cuenta con tres cuartos, dos baños, cocina, comedor y sala. Los análisis se dividieron en tres categorías según la variable que se analizó:

**A)** Estudio según ubicación. Se analizaron las tres posibles posiciones de la casa mostradas en la Figura 2.1. La separación entre los costados de las casas es de un metro y en la parte trasera de las casas la separación entre los terrenos está definida por un muro que se encuentra a tres metros de distancia de las casas.

**B)** Estudio según orientación.- La orientación de la casa se va determinar respecto a la puerta principal de la casa. Si la puerta mira al Norte, entonces identificamos esa casa con orientación Norte. Las orientaciones analizadas son las cuatro principales: Norte, Sur, Este y Oeste.

**C)** Estudio según aislamiento.- Se consideró a la fibra de vidrio como aislante y se simuló los casos cuyos arreglos se describen en la Tabla 2.4.

---

Tabla 2.4: Descripción de casos analizados para evaluar el efecto del aislamiento térmico de una casa.

Nomenclatura	CASOS
	Significado
Base	Cuando la casa no cuenta con aislamiento térmico
LR5	Techo aislado con fibra de vidrio con un valor R5
LR10	Techo aislado con fibra de vidrio con un valor R10
LR13	Techo aislado con fibra de vidrio con un valor R13
LR19	Techo aislado con fibra de vidrio con un valor R19
LR30	Techo aislado con fibra de vidrio con un valor R30
FPR5	Paredes frontales y posteriores de la casa aisladas con fibra de vidrio con un valor R5
FPR8	Paredes frontales y posteriores de la casa aisladas con fibra de vidrio con un valor R8
IDR5	Paredes izquierda y derecha de la casa aisladas con fibra de vidrio con un valor R5
IDR8	Paredes izquierda y derecha de la casa aisladas con fibra de vidrio con un valor R5
MR5	Todos los muros aislados con fibra de vidrio con un valor R5
MR8	Todos los muros aislados con fibra de vidrio con un valor R8
R5,R10	Todos los muros aislados con fibra de vidrio con un valor R5 y techo aislado con fibra de vidrio con un valor R10
R5,R13	Todos los muros aislados con fibra de vidrio con un valor R5 y techo aislado con fibra de vidrio con un valor R13
R8,R10	Todos los muros aislados con fibra de vidrio con un valor R8 y techo aislado con fibra de vidrio con un valor R10
R8,R13	Todos los muros aislados con fibra de vidrio con un valor R8 y techo aislado con fibra de vidrio con un valor R13
TR5	Toda la casa aislada con fibra de vidrio con un valor R5
TR10	Toda la casa aislada con fibra de vidrio con un valor R10
TR13	Toda la casa aislada con fibra de vidrio con un valor R13

En esta tesis los casos correspondientes a los incisos A) y B) fueron realizados simultáneamente de tal forma que se abarcaron todas las posibilidades. El inciso C) se estudió con para la orientación al Norte y la posición centrada. En todos los casos se consideró que el sistema de refrigeración opera las 24 horas del día con un set-point de 25° C. Las consideraciones restantes que se ocuparon en las simulación se describen en la siguiente a continuación.

### 2.3.2. Consideraciones para simulación de una casa típica

Existen disponibles en la página electrónica del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América bases de datos que contienen archivos con información climatológicos de varias regiones y ciudades. Estas bases de datos están en un formato apropiado para su uso en el software Energu-Plus, no obstante, no existe el archivo para la ciudad de Monterrey, Nuevo León. De acuerdo a la clasificación Köppen, las ciudades de Monterrey y McAllen, Texas, USA, tienen la misma clasificación (BSh) [12]. Por esa razón se utilizaron los datos de clima de la ciudad de McAllen para el presente análisis.

Los modelos tridimensionales que se utilizaron para determinar los archivos que contienen los factores fueron elaborados bajo las siguientes condiciones:

- Datos Climáticos de simulación

McAllen-Texas-USA. Latitud  $26.31^\circ$ , Longitud  $-98.17^\circ$

- Detalles del sitio

Monterrey- NL-México. Latitud  $25.78^\circ$ , Longitud  $-100.1^\circ$

Elevación del mar.- 387 m

Zona horaria (GTM-06:00) México City

- Temperaturas de terreno por mes:

Enero	$18.8^\circ C$	Julio	$25.0^\circ C$
Febrero	$19.9^\circ C$	Agosto	$26.3^\circ C$
Marzo	$21.1^\circ C$	Septiembre	$26.6^\circ C$
Abril	$19.1^\circ C$	Octubre	$25.8^\circ C$
Mayo	$21.0^\circ C$	Noviembre	$24.2^\circ C$
Junio	$23.1^\circ C$	Diciembre	$22.2^\circ C$

Las dimensiones geométricas de los modelos son las que se muestran en la Figura 2.16. La altura entre el piso y techo de cada casa es de 2.6 m, con puertas exteriores de  $2.10 \text{ m} \times 0.9 \text{ m}$ . Las dimensiones de las ventanas y posición de éstas varía según el diseño del plano arquitectónico.

La constitución de los muros y la losa del techo de la vivienda simulada se describen en la Tabla 2.5. Se incluyen los materiales de construcción que

fueron considerados para las simulaciones, así como los valores de sus propiedades termofísicas. Los acristalamientos en este análisis suponen una lámina de vidrio con un espesor de 3 mm, cuyas propiedades de transmisión de calor y luz solar se muestran en la Tabla 2.6. En cada uno de los casos con aislamiento se simuló el uso de fibra de vidrio, cuyas propiedades fueron tomadas de la Tabla 2.2.

Tabla 2.5: Características de los muros y losas utilizados.

Estructura			Propiedades de los materiales			
Elemento	Material	Espesor (m)	Material	Densidad (kg/m³)	Calor específico (J/kg·K)	Conductividad térmica (W/m²°C)
Muros	Mortero	0.013				
	Block de concreto	0.150				
	Yeso	0.013				
Losa	Concreto	0.050	Block concreto	2300	1000	1.63
	Barro Block	0.100	Barro-block	2225	960	0.5
			Concreto	2000	1000	1.13
	Yeso	0.013	Mortero	2800	896	0.88
			Yeso	900	1000	0.25

Tabla 2.6: Propiedades de los acristalamientos, incluyendo el coeficiente global de transferencia de calor  $U$ .

Transmisión Solar Total (SHGC)	0.713
Transmisión solar directa	0.645
Transmisión de luz	0.685
Valor U (W/m <sup>2</sup> K)	6.257

## 2.4. Generalización de resultados para casas típicas

Con el análisis desarrollado hasta este punto es posible evaluar el comportamiento de una casa típica, en términos de las cargas térmicas a las que está sujeta, las ventajas obtenidas con el uso de aislamientos térmicos, el efecto de los puentes térmicos y el consumo de energía necesaria para el sistema de acondicionamiento de aire que mantiene las condiciones de confort en el recinto. Sin embargo, en el caso de que se requiera evaluar un diseño específico de casa habitación con una cierta orientación y características particulares, habrá que repetir el análisis expuesto en este trabajo de tesis. Esto representa una limitación en términos prácticos. El análisis de casos particulares resulta poco atractivo como método sistemático para

la selección de soluciones, basadas en la aplicación óptima de aislamiento térmico, para la reducción de la energía eléctrica consumida por los sistemas de acondicionamiento de aire.

En los estudios que se deben llevar a cabo para el análisis de viviendas de una misma región existen factores que se repiten tales como el clima, la radiación y la posición solar. De igual forma, existen diseños en los que solo se modifican los tamaños de las áreas de los muros y techos de los recintos. Ahora, como el objeto que se persigue a través del análisis de las cargas térmicas de una casa habitación es la evaluación de la transferencia de calor a través de los diferentes elementos de la envolvente, como muros, ventanas, puertas, techos y pisos. Entonces, resulta interesante y conveniente la búsqueda de factores que ponderen adecuadamente los efectos de las cargas térmicas por unidad de área para cada uno de los elementos de la envolvente. Se propone entonces completar una base de datos que incluya las variantes más importantes que afectan a la carga térmica y que contenga una amplia variedad de diseños típicos en la región de interés.

Para llevar a cabo el análisis se hizo uso de software Energy-Plus y se realizaron simulaciones computacionales de acuerdo a un diseño de experimentos que se desarrolló para caracterizar seis modelos geométricos diferentes que son típicamente usados en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México. Los seis modelos analizados, mostrados en la Figura 2.16, fueron proporcionados al autor por diversas constructoras. Se pretende entonces utilizar la información disponible para generalizar los resultados de tal manera que se encuentre el comportamiento global de las casas-habitación que son construidas de forma masiva en el noreste del país.

El diseño de experimentos incluyó, para cada uno de los seis modelos de casa, los siguientes aspectos:

1. Posición de la casa

- Izquierda
- Centrada
- Derecha

2. Orientación

---

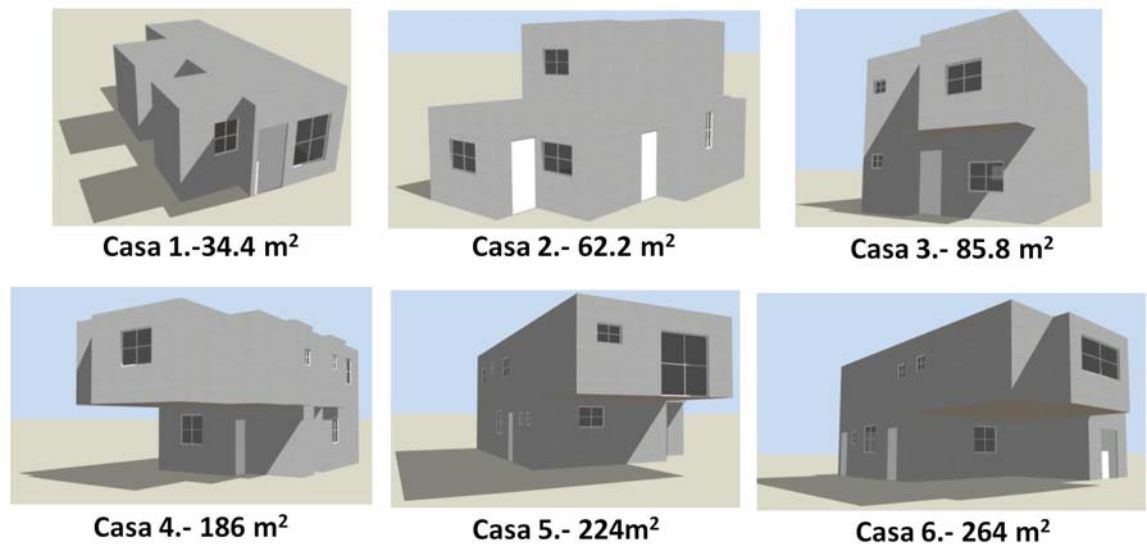


Figura 2.16: Bosquejos de seis diseños que son típicos en la región noreste de México y que fueron analizados en la etapa de generalización de resultados.

- Norte
- Sur
- Este
- Oeste

3. Tiempo de refrigeración. Tiempo que opera por día el sistema de aire acondicionado

- 24 horas al día
- 12 horas al día
- 6 horas al día

4. Aislamiento térmico

- Sin aislamiento térmico
  - Con aislamiento térmico en los muros
  - Con aislamiento térmico en los techos
-



Se analizaron tres modos de operación de los sistemas de refrigeración. El primero, denotado como *24 hrs*, considera que el sistema de aire acondicionado trabaja todo el día y todos los días del año. El segundo, indicado como *12 hrs* y considera que el sistema de aire acondicionado opera de 6 pm a 6 am de todos los días del año, y finalmente, el tercer modo, *6 hrs*, considera operación diaria de 12 am a 6 am. Los horarios se eligen de ese modo considerando que en general una casa queda desocupada a lo largo del día, y es por la noche cuando se encuentra habitada y requiere del acondicionamiento de aire. Por otra parte, el uso de aislantes térmicos es crucial para la reducción del consumo de energía para el acondicionamiento de aire, por esa razón, se analizó una amplia variedad de opciones. En este último punto se buscó identificar los muros que al aislarse generan mejores resultados, además de definir el tipo idóneo de aislante térmico que se requiere. La recomendación general es que el aislante del techo debe ser mayor al de los muros. La Figura 2.17 ilustra de forma específica las opciones relacionadas con el diseño de experimentos que se trabajó en esta investigación. En esa figura se resume la combinación de los tipos de aislamientos térmicos en muros y losas.

El objeto principal es conocer el comportamiento de los recintos en lo particular para generar soluciones generalizadas con toda la información obtenida. Por esa razón, las simulaciones realizadas consideraron las cargas térmicas que tiene el recinto como resultado de su interacción con el medio que lo rodea. Los cálculos no considera la generación interna de calor en el recinto ni las cargas debidas a las infiltraciones. Se pone especial interés en evaluar los flujos de calor a través de cada elemento de la envolvente por unidad de área.

La estrategia para evaluar de manera generalizada el comportamiento de los modelos de casas habitación típicas en el noreste de México permite determinar la carga total de calor que experimenta una casa de dimensiones dadas. La estrategia es como sigue:

1. Generar una base de datos aplicando el diseño de experimentos mostrado en la Figura 2.17 a los seis modelos de casa ilustrados en la Figura 2.16.
  2. Organizar la información obtenida identificando la carga térmica a través de cada uno de los elementos de la envolvente,  $Q_i$ .
-

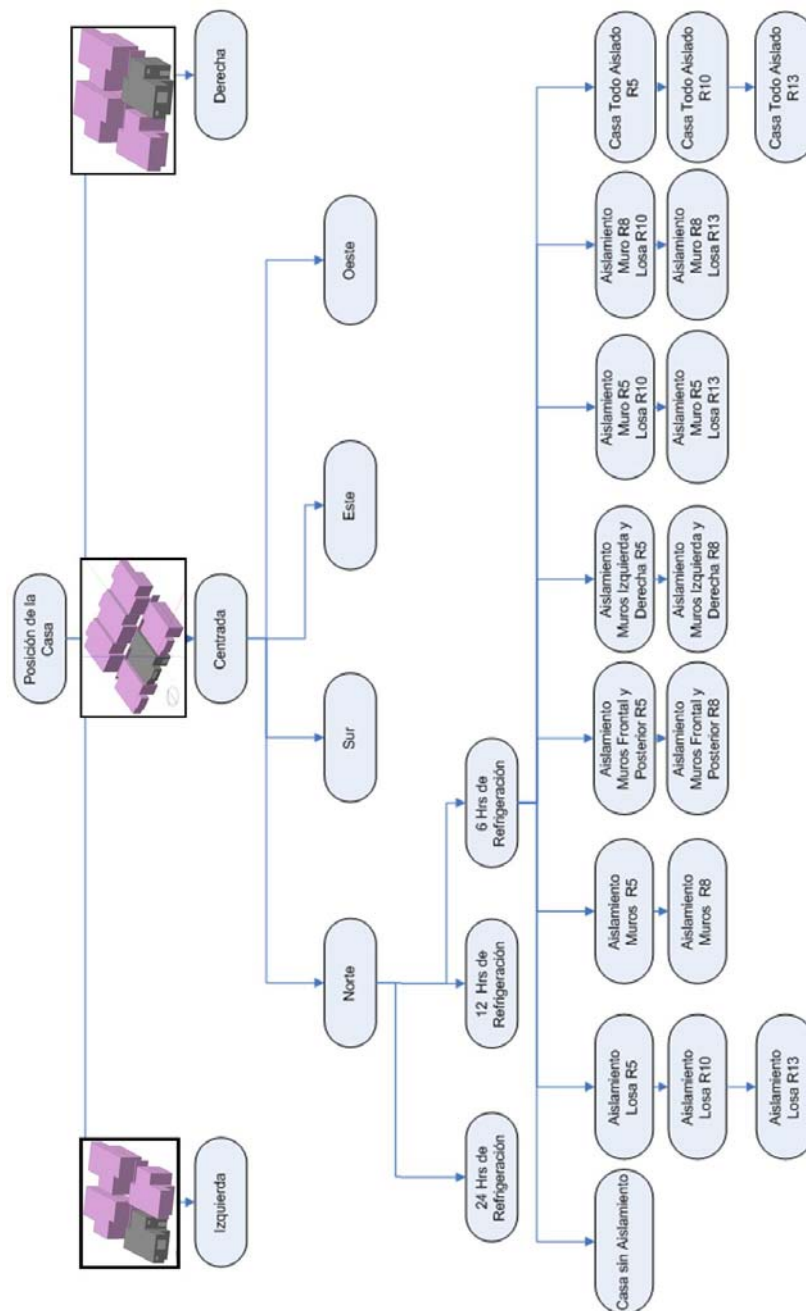


Figura 2.17: Casos estudiados para generar una base de datos que permita la generalización de los resultados al incluir los principales aspectos relacionados con las cargas térmicas de los elementos de la envolvente. Este diseño de experimentos se aplica para cada uno de los seis modelos de casa que se muestran en la Figura 2.16.

Tabla 2.7: Estimación de la media aritmética del flujo de calor en el techo en los seis modelos de casas habitación.

Transferencia de calor por Techo (kWh/m <sup>2</sup> )							q''
q'' = Q/A							Mediana
Mes	Casa 1	Casa 2	Casa 3	Casa 4	Casa 5	Casa 6	(Estadística)
Junio	10.4	9.46	10.6	16.9	10.8	11.2	<b>10.67</b>
Julio	12.3	11.46	12.7	20.2	13.0	13.4	<b>12.86</b>
Agosto	10.1	9.39	10.6	16.6	10.8	11.1	<b>10.69</b>

3. Evaluar el flujo de calor, i.e. el calor por unidad de área, para cada uno de los elementos de la envolvente.

$$q_i'' = \frac{Q_i}{A_i} \quad (2.30)$$

4. Agrupar toda la información en seis grupos, uno para cada uno de los modelos de casa.
5. Organizar la información del flujo de calor de acuerdo a elementos homólogos, e.g. techo, en el que todas las variables sean las mismas, i.e. misma orientación, posición de la casa, tiempo de refrigeración y las mismas condiciones de aislamiento térmico.
6. Se calcula la media aritmética del flujo de calor de los seis modelos y se obtiene un valor único para el flujo de calor, e.g. el techo, en cada mes del año. El valor así obtenido contiene la información de los seis modelos típicos de construcción. La Tabla 2.7 ilustra el cálculo de los valores numéricos que corresponden al techo para tres meses distintos.

Ahora es posible calcular la carga térmica para una casa típica con dimensiones dadas y en un lapso de tiempo de interés.

7. Para estimar el calor que fluye a través de un cierto elemento en una casa de dimensiones dadas se multiplica el valor obtenido con el análisis generalizado por el área de ese elemento en la casa de interés.

$$Q_{i,estimado} = q_{i,media}'' A_i \quad (2.31)$$

8. Para determinar la carga total de calor en un recinto de dimensiones dadas, se suman las cargas que corresponden a todos los elementos de la envolvente como techo, muro, ventanas, pisos, puertas.

$$Q_{estimado} = \sum Q_{i,estimado} \quad (2.32)$$

Mediante la aplicación de esta estrategia es posible estimar el comportamiento de casas habitación de dimensiones hasta cierto punto arbitrarias, en razón de que el cálculo se hace a través de coeficientes que se obtuvieron de seis modelos típicos y fueron evaluados por unidad de área. Es importante destacar que conforme la base de datos incluye resultados de un mayor número de casas, la precisión del método mejora.

## 2.5. Generación de soluciones óptimas

El análisis generalizado también incluye la información relacionada con el consumo de energía del sistema de acondicionamiento térmico. Entonces, estamos en la posibilidad de analizar las ventajas cuantitativas del uso de aislamientos térmicos en casas típicas del noreste de México.

Mediante una comparación entre los resultados correspondientes a los consumos de energía del sistema de acondicionamiento de aire, obtenidos a través de periodos anuales, es posible identificar los beneficios cuantitativos del uso de los diferentes aislamientos térmicos empleados en los techos y los muros. Además, las distintas soluciones aplicadas para reducir los consumos de energía representan una inversión económica para los usuarios. Aislar completamente el recinto requiere de una mayor inversión si se compara con una práctica de aislamiento localizado. Adicionalmente, existen varios productos disponibles en el mercado, cada uno de ellos con ventajas y desventajas que vale la pena que evaluar objetivamente.

La identificación de soluciones óptimas está entonces basada en la evaluación del ahorro económico que representan las disminuciones del consumo de energía por parte del sistema de acondicionamiento de aire. Lo deseable es que el costo de la instalación del aislamiento térmico se cubra mediante el ahorro en el pago de la energía eléctrica. Incluso, la mejor opción debería representar una opción atractiva económicamente

---

para los usuarios. En el caso más desfavorable, si el costo de la solución se alcanza a cubrir con los ahorros en el pago de la energía de manera ajustada, la ventaja de esa solución está en la reducción en el impacto ambiental que representa la energía que dejó de consumirse.

---

## CAPÍTULO 3

# RESULTADOS

---

### 3.1. Transferencia de calor en muros y techos

Los resultados que se presentan en esta sección corresponden al análisis realizado para determinar la transferencia de calor en techos y muros que son típicos en las construcciones del noreste del país. La herramienta empleada fue el software comercial ANSYS-FLUENT. Los gráficos mostrados ilustran la distribución de temperatura en el interior de los techos y muros, además, se muestran las curvas del flujo de calor local. A través de la evaluación del calor total transferido se ha estimado el valor de la resistencia térmica equivalente  $R$  de los elementos en estudio como

$$R = \frac{A\Delta T}{Q} \quad (3.1)$$

donde  $A$  es el área superficial exterior del elemento de la envolvente de la que se trate y  $\Delta T$  es la diferencia entre las temperaturas de la cara exterior e interior. Para los casos simulados en dos dimensiones, se estableció un área superficial exterior unitaria (de un metro cuadrado).

#### 3.1.1. Techos exteriores

Los casos analizados en el estudio de los techos que están expuestos a las condiciones ambientales externas son los siguientes:

- A) Techo de concreto de 10 cm de espesor y sin aislamiento térmico.

**B)** Techo de concreto de 10 cm de espesor, con aislamiento térmico R10 por la parte inferior (que corresponde a un aislamiento comercial de fibra de vidrio de 7.6 cm) y con un acabado interior de tabla de yeso de 1.3 cm de espesor.

**C)** Techo de concreto de 10 cm de espesor, con aislamiento por la parte inferior R30 (fibra de vidrio 24.1 cm) y una tabla de yeso de 1.3 cm.

**D)** Techo de vigueta y bovedilla de EPS de 12 cm de espesor.

**E)** Techo de vigueta y bovedilla de EPS de 13 cm de espesor.

**F)** Techo de vigueta y bovedilla de EPS de 15 cm de espesor.

**G)** Techo de vigueta y bovedilla de EPS de 12 cm de espesor, con aislamiento R5 de XPS en la parte inferior de la vigueta. La Figura 2.4 muestra un esquema de este diseño.

**H)** Techo de vigueta y bovedilla de EPS de 12 cm de espesor, con aislamiento R13 (fibra de vidrio 8.9 cm) en la parte inferior y una tabla de yeso de 1.3 cm.

En la Figura 3.1 se muestra la distribución de la temperatura para las losas de concreto, casos **A**, **B** y **C**. Por su parte, la Figura 3.2 muestra las temperaturas en los techos de vigueta y bovedilla de EPS, casos **D**, **E** y **F**, además de los casos **G** y **H** que corresponden a los techos de vigueta y bovedilla de EPS con aislamiento térmico.

Para los tres casos correspondientes a los techos de placa de concreto es posible distinguir que la temperatura tiene una variación proporcional a la distancia en la dirección perpendicular al techo, i.e. el gradiente de temperatura en el interior de los techos de concreto es constante. Esto se hace evidente al observar que la separación entre las distintas isotermas es constante, Figura 3.1. Adicionalmente, en los casos **B** y **C**, es posible observar que el uso del aislamiento produce un menor gradiente térmico en la placa de concreto; en este caso una disminución importante de la temperatura queda localizada en la región del aislante térmico. La reducción del gradiente de temperatura en la región de mayor conductividad térmica, i.e. en la placa de concreto, se traduce en una disminución en el calor transferido a través del techo. Es importante comentar que en estos tres casos el flujo de calor es unidimensional.

---

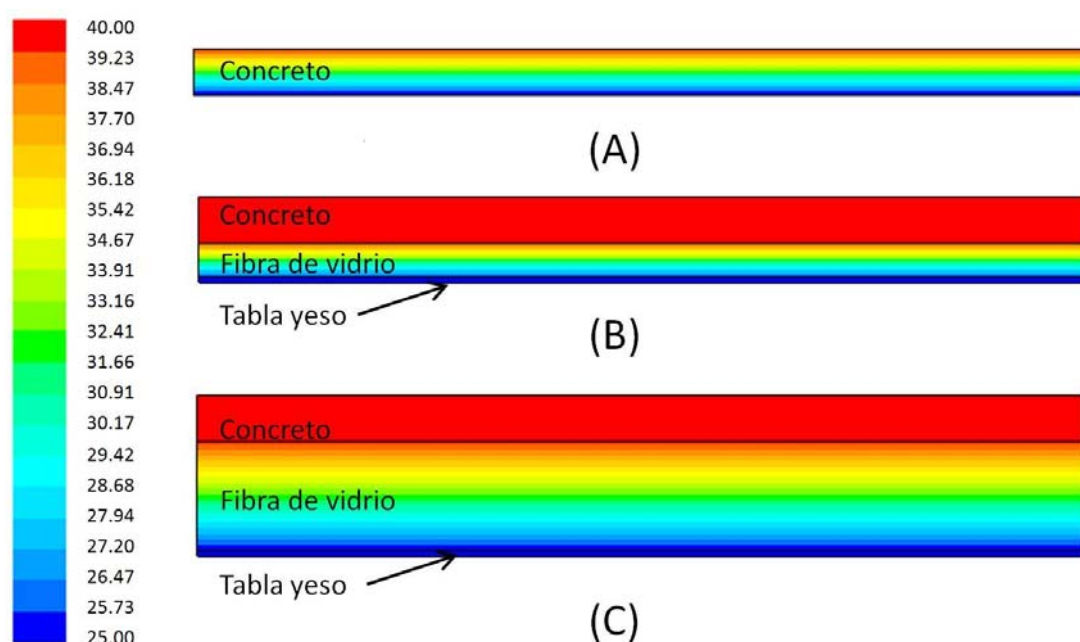


Figura 3.1: Distribución de temperaturas en el interior de los techos de concreto. La temperatura interior es de 25°C y la exterior de 40°C.

Los contornos de temperatura para los techos de vigueta y bovedilla ya no muestran que el cambio de la temperatura sea proporcional a distancia en la dirección perpendicular al techo, ver Figura 3.2. En estos casos, los materiales de los que están hechas la vigueta y la bovedilla son de conductividades térmicas muy distintas entre sí. Por esa razón, los gradientes de la temperatura ya no son uniformes en el interior de los techos y el flujo de calor es bidimensional. Al observar las isotermas en la Figura 3.2 es evidente que existen gradientes de temperatura intensos que pueden considerarse como puentes térmicos. Específicamente, las costillas de las viguetas son las que en este caso operan como puentes que facilitan el flujo de calor. Es claro que el uso del aislante térmico, caso **H**, genera una reducción importante del gradiente de temperatura en una gran parte de la zona de alta conductividad térmica (la vigueta), por lo que se puede esperar una reducción importante en el flujo de calor ese caso.

En la Figura 3.3 se muestran las gráficas del flujo de calor local en la superficie externa de los sistemas de vigueta y bovedilla. Estas gráficas permiten evaluar de forma cuantitativa las regiones del sistema que facilitan el paso de calor (puentes



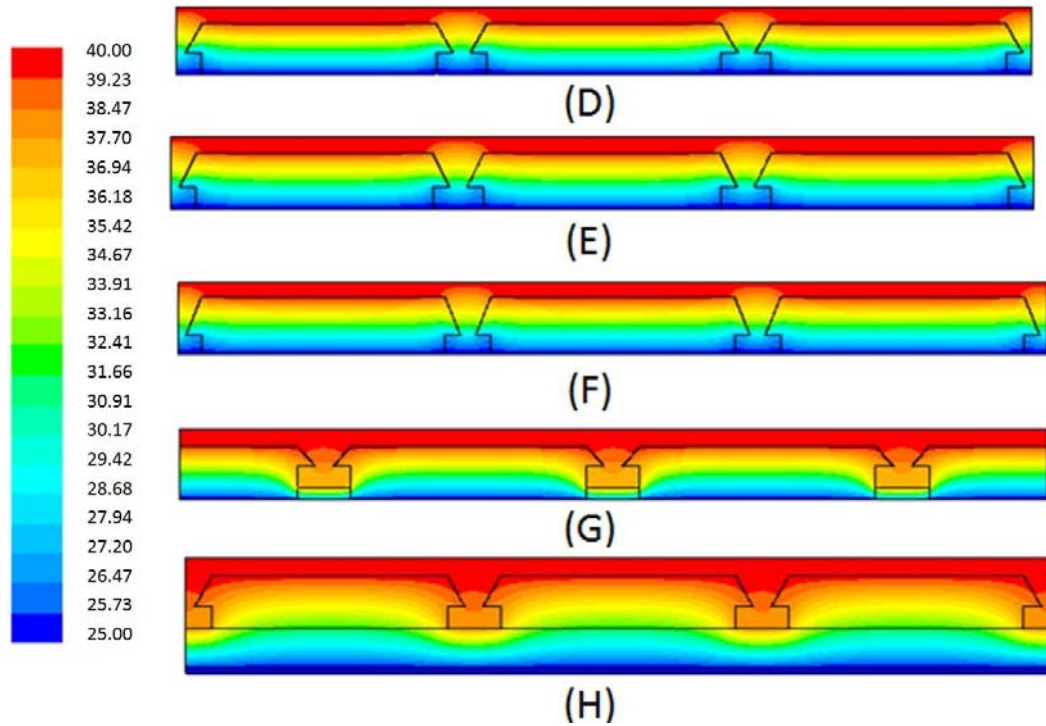


Figura 3.2: Distribución de temperatura en el interior de los techos de vigueta y bovedilla. La temperatura interior es de 25°C y la exterior de 40°C.

térmicos). El flujo de calor local se define como:

$$q'' = \frac{dQ}{dA} \quad (3.2)$$

donde

$$dA = W dx \quad (3.3)$$

y en este caso  $W$  es el ancho en la dirección perpendicular al papel.

Entonces, el calor total que se transfiere en cada uno de los casos se calcula como

$$Q = \int q'' dA = W \int q'' dx \quad (3.4)$$

En otras palabras, el flujo de calor total en las superficies de los techos analizados es proporcional a las áreas bajo las curvas de los gráficos mostrados en la Figura 3.3.

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados del calor transferido y la resistencia térmica obtenidos en las simulaciones llevadas a cabo para techos exteriores. El peor

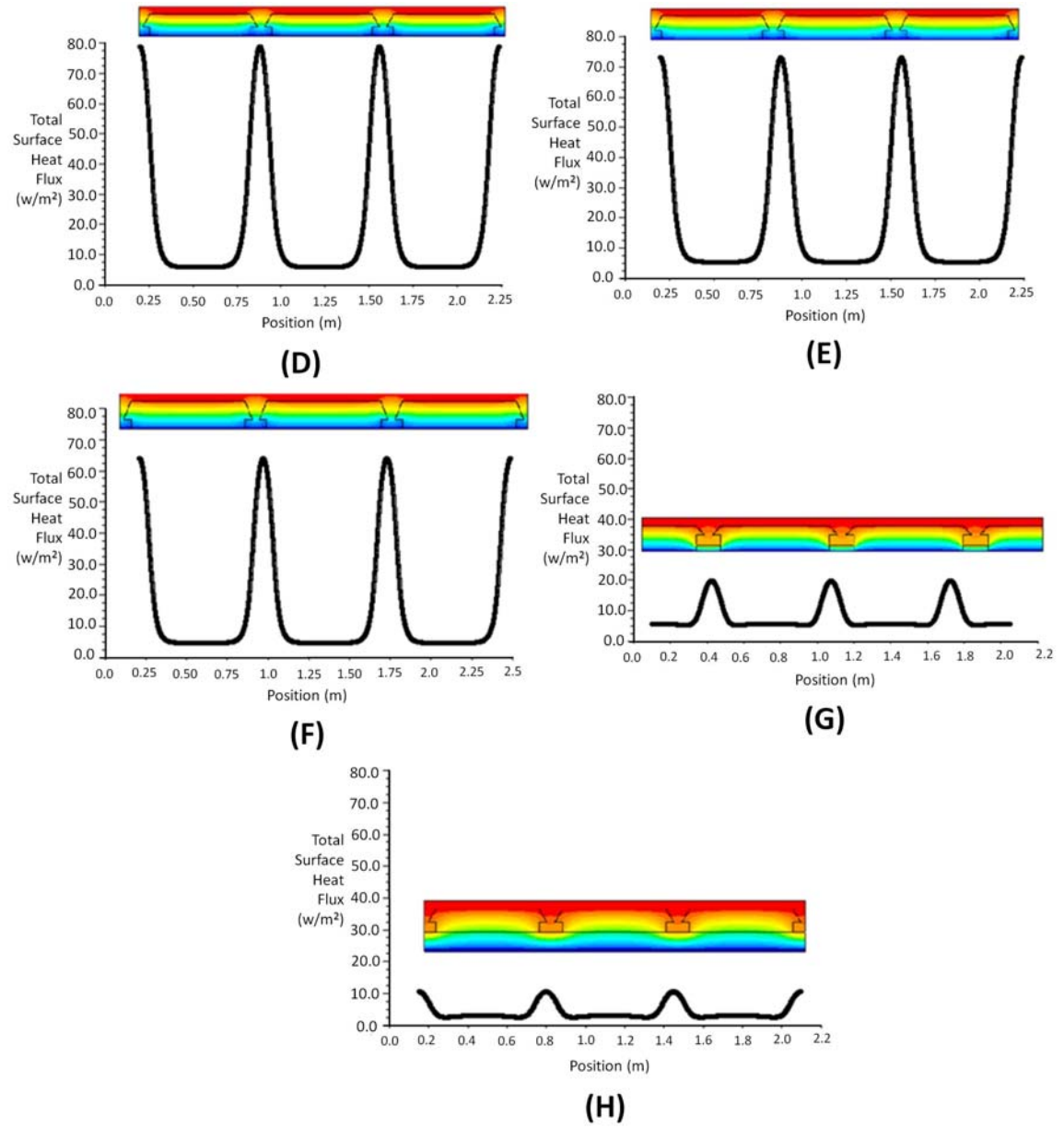


Figura 3.3: Flujo de calor local en la superficie exterior para los techos de vigueta y bovedilla.

desempeño lo tuvo el caso **A**, que permite el paso de  $195 \text{ W/m}^2$  con una resistencia térmica  $0.077 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Para los casos **B**, **C**, **G** y **H**, en los que se emplearon aislantes térmicos, se observa una disminución importante en la cantidad de calor transferida y un incremento en su resistencia térmica. El mejor desempeño lo mostró el caso **C**

que emplea un aislamiento de fibra de vidrio con un valor R30, en cuyo caso el flujo de calor fue de  $2.5 \text{ W/m}^2$ ; le siguen los casos **H** y **G**, que utilizan XPS con R5, con un flujo de  $4.17 \text{ W/m}^2$  y  $7.86 \text{ W/m}^2$ , respectivamente. En la última columna de la Tabla 3.1 se pueden observar los resultados de la resistencia térmica expresados en unidades del sistema inglés.

Tabla 3.1: Resultados de la transferencia de calor a través de los techos.

Caso	Flujo de calor ( $\text{W/m}^2$ )	Resistencia Térmica ( $\text{m}^2\text{K/W}$ )	Resistencia Térmica ( $\text{ft}^2\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{F}/\text{BTU}$ )
A.- Concreto sin aislamiento	195.06	0.077	0.437
B.- Concreto aislado con R10	7.91	1.896	10.765
C.- Concreto aislado con R30	2.50	5.998	34.057
D.- VB con EPS de 12 cm	20.10	0.746	4.235
E.- VB con EPS de 13 cm	18.75	0.799	4.537
F.- VB con EPS de 15 cm	15.26	0.982	5.576
G.- VB con EPS de 12 cm y vigueta aislada con R5	7.86	1.906	10.822
H.- VB con EPS de 12 cm y con aislamiento R13	4.17	3.594	20.407

Con el objeto de hacer más ilustrativa la comparación entre los casos analizados, la Figura 3.4 presentan de forma gráfica los resultados de flujo de calor y la resistencia térmica de todos ellos.

### 3.1.2. Muros exteriores

Los muros que tiene contacto con el medio exterior tienen un comportamiento semejante a los techos. Como se comentó en el Capítulo 1, los casos analizados para los muros son los siguientes:

- A) Muro de concreto con un espesor de quince centímetros sin aislamiento térmico.
- B) Muro de block hueco sin aislamiento térmico.
- C) Muro de block relleno con aislamiento.

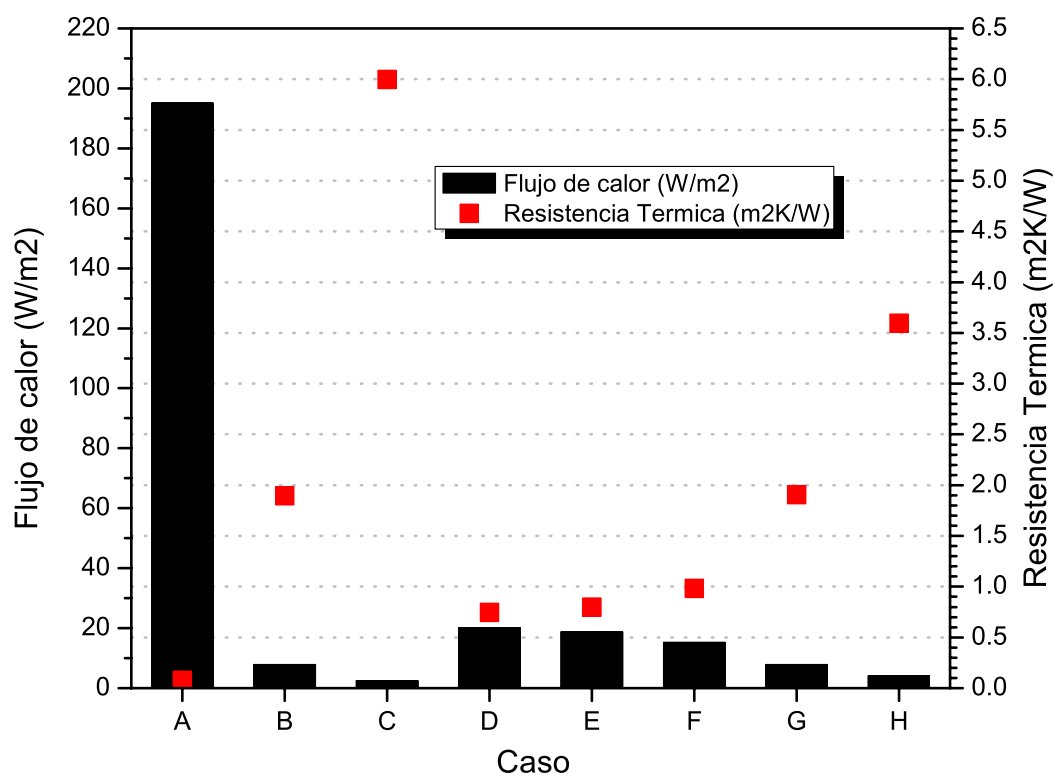


Figura 3.4: Gráfico comparativo del flujo de calor y la resistencia térmica equivalente de los techos analizados.

**D)** Muro de ladrillo sin aislante térmico.

**E)** Muro de “concreto-aislante” sin aislamiento.

**F)** Muro de concreto-aislante con aislante R10.

**F-1)** Muro de concreto-aislante R10 con costilla totalmente de concreto.

**F-2)** Muro de concreto-aislante R10 con costilla de concreto y una pulgada de madera.

**G)** Muro de concreto-aislante R13.

H) Muro de concreto-aislante R19.

En la Figura 3.5 están representados los contornos de la temperatura para los casos en los que el estudio se hizo en dos dimensiones.

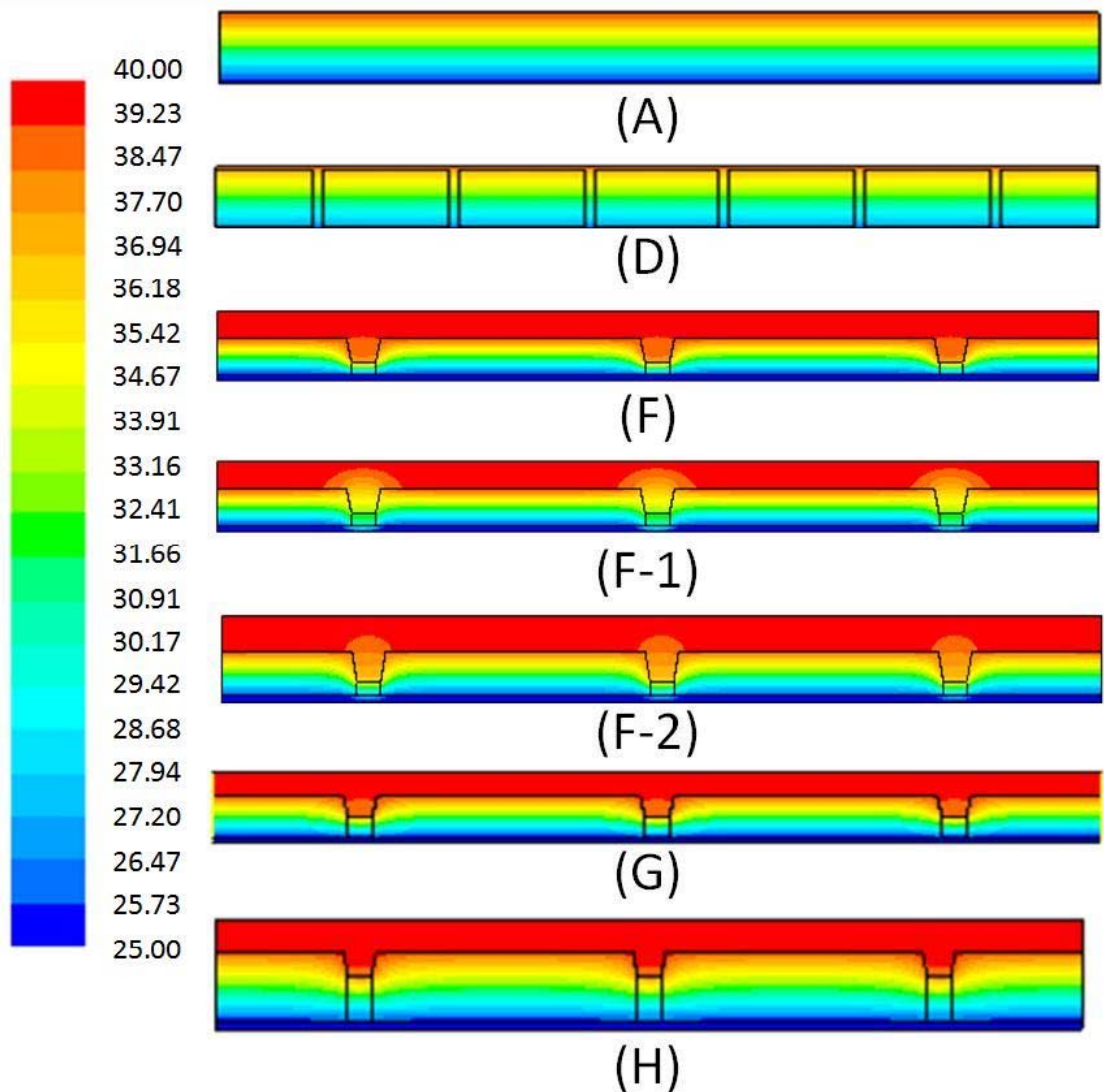


Figura 3.5: Contornos de temperatura en los muros. La temperatura interior es de 25°C y la exterior de 40°C.

En los casos **A** y **D** el flujo de calor es prácticamente unidimensional y el gradiente de temperatura constante. En los casos **F**, **F-1**, **F-2**, **G** y **H**, el flujo es bidimensional y es posible apreciar el efecto del cambio de la conductividad

térmica en los componentes de la pared, principalmente en las zonas de las costillas de concreto.

La Figura 3.6 muestra el flujo de calor local para todos los casos mostrados en la Figura 3.5, excepto el que corresponde al caso **A** (muro de concreto) debido a que el flujo de calor a través de éste es constante e igual a  $173.3 \text{ W/m}^2$ . Los gráficos mostrados en esta figura permiten apreciar los puentes térmicos que aparecen en cada uno de los casos estudiados. Es notable que en el caso ladrillo con mortero, **D**, la mayor parte del calor ingresa a través de los ladrillos y en el mortero se reduce la transferencia de calor.

En los muros de concreto con fibra de vidrio como aislante, casos **F**, **F-1**, **F-2**, **G** y **H**, se puede apreciar una reducción importante en el flujo de calor en las regiones donde se encuentra la fibra de vidrio, además de la presencia de puentes térmicos semejantes a los que ocurren en los techos de vigueta y bovedilla. El puente térmico que permite mayor transferencia de calor es el que corresponde al caso **F-1** que alcanza  $53 \text{ W/m}^2$ , valor cercano al flujo en la pared de ladrillo del caso **D**. La disminución de los flujos en los puentes térmicos se explica por el incremento en el espesor del poliestireno extruido en cada una de sus uniones.

Los casos **B**, **C** y **E** corresponden a situaciones que debieron ser analizadas en modelos de tres dimensiones. Los contornos de temperatura se ilustran con imágenes que muestran vistas isométricas y planos. Para los casos del block y el muro de concreto con cavidad de aire, se incluyen imágenes de la distribución de temperatura y los vectores de velocidad del flujo de convección natural que ocurre en el interior de las cavidades.

En el estudio de los muros contruidos con blocks se abordaron dos casos. La Figura 3.7 muestra los contornos de temperatura de la superficie exterior en la vista isométrica. Además, se incluyen tres planos horizontales a diferentes alturas del muro.

Esta diferencia de temperaturas en los planos mostrados contribuye al movimiento del aire dentro del block, facilitando la transferencia de calor de las zonas más calientes a las más frías. Los contornos de velocidad de temperatura del recuadro superior derecho en la Figura 3.7 describen el comportamiento termodinámico que se presentan dentro del block (Vista isométrica del interior del block). En la vista intermedia de los vectores de velocidad del block se aprecia que los vectores de color azul

---

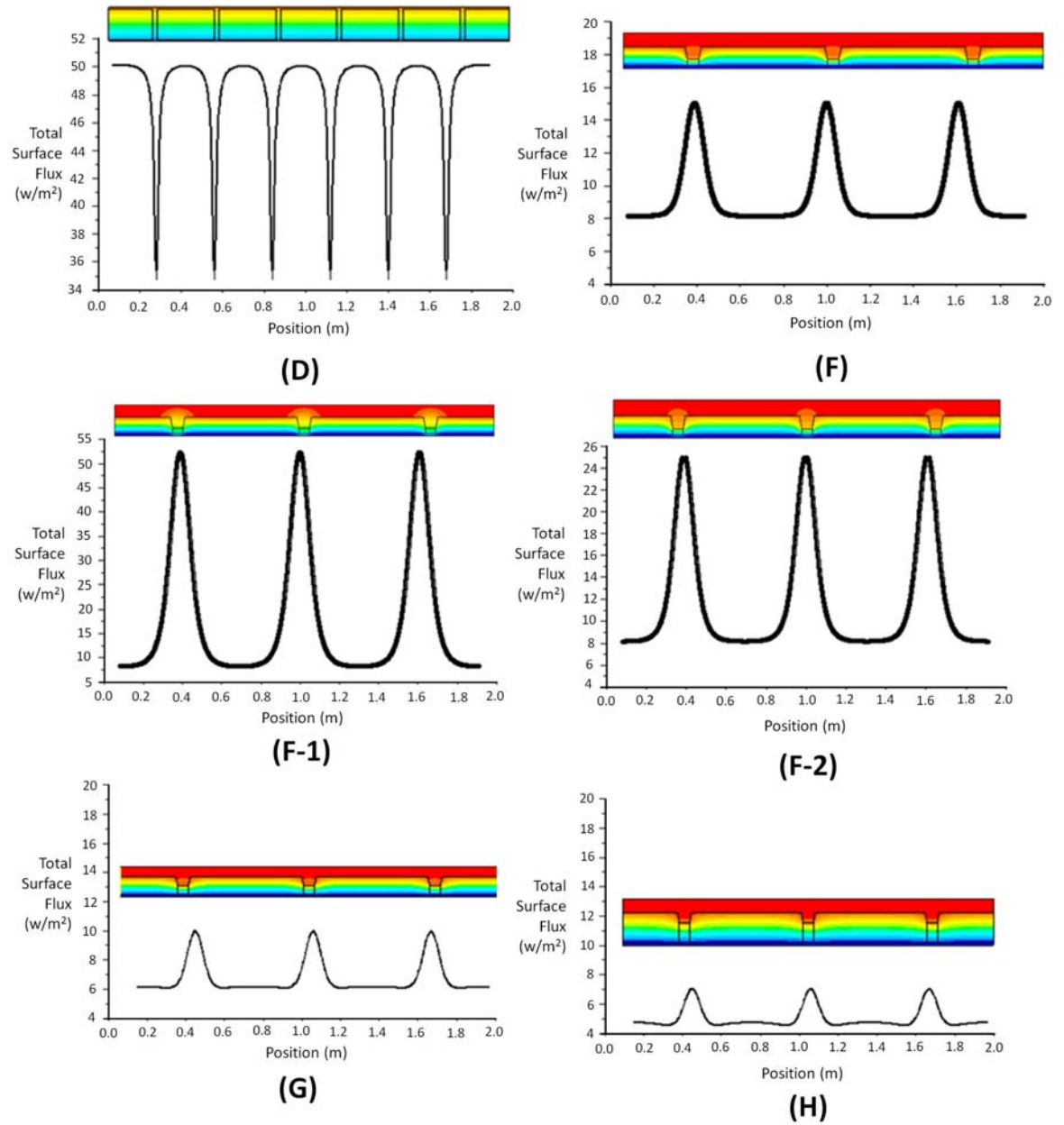


Figura 3.6: Flujo de calor local en la superficie exterior de los muros.

con temperaturas próximas a los  $27^{\circ}\text{C}$  descienden a través de la cavidad, mientras los vectores de color amarillo con temperaturas próximas a los  $35^{\circ}\text{C}$  ascienden.

Para el caso **C**, que utiliza aislamiento térmico en el interior de las cavidades, la distribución de temperatura es la que se muestran en la Figura 3.8. Los contornos de



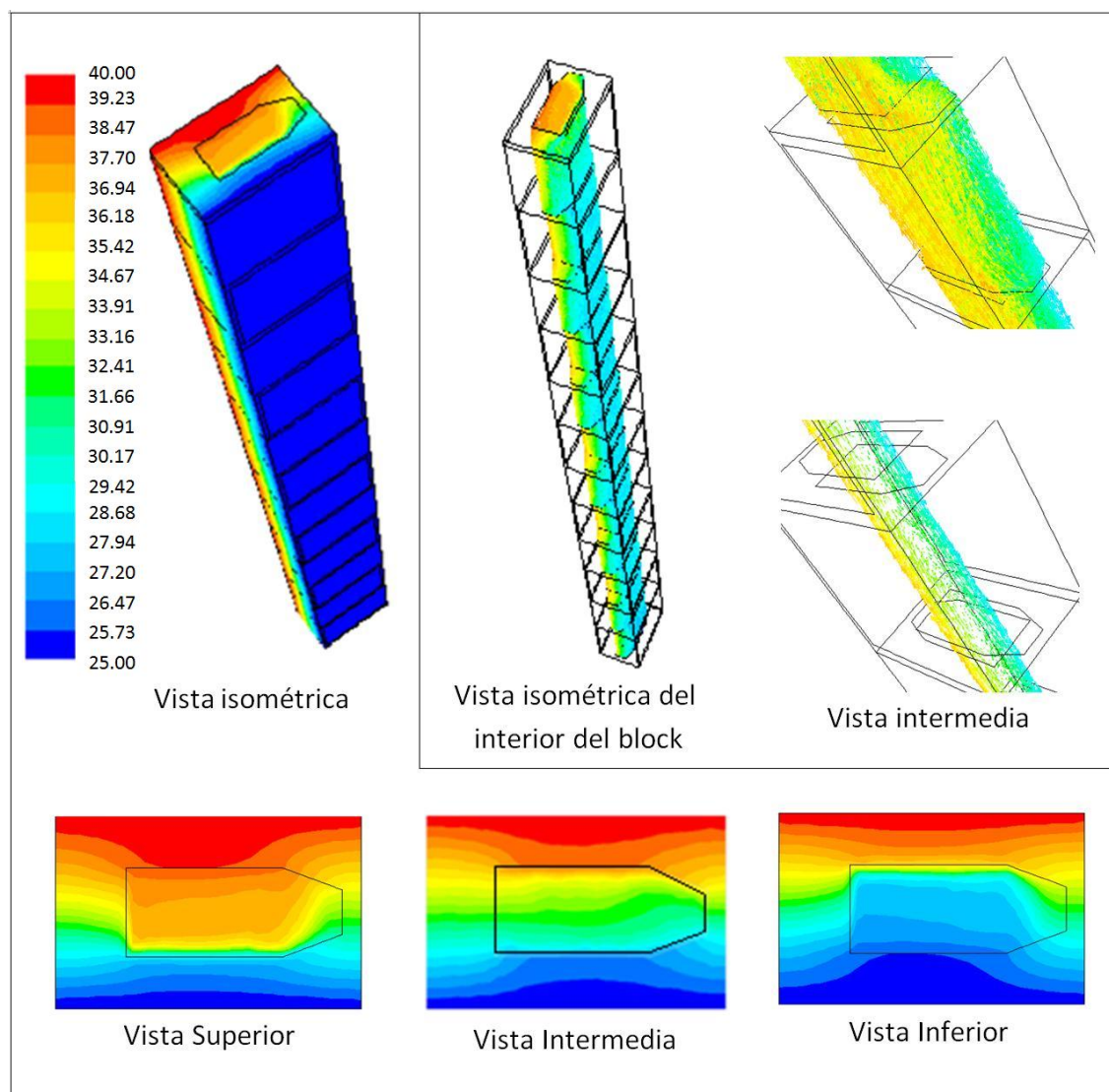


Figura 3.7: Distribución de temperatura y vectores de velocidad del aire en el interior del block hueco de concreto en el caso **B**.

temperatura muestran lo que ocurre cuando en el interior de la cavidad se encuentra colocada la fibra de vidrio. El aislante llena el espacio que originalmente contiene aire y evita la transferencia de calor por convección. El transporte de calor es únicamente por conducción y tiene que ocurrir a través del aislante térmico.

El último caso que se estudió para los muros, **E**, tiene la distribución de temperatura y vectores de velocidad que se muestra en la Figura 3.9. Se puede



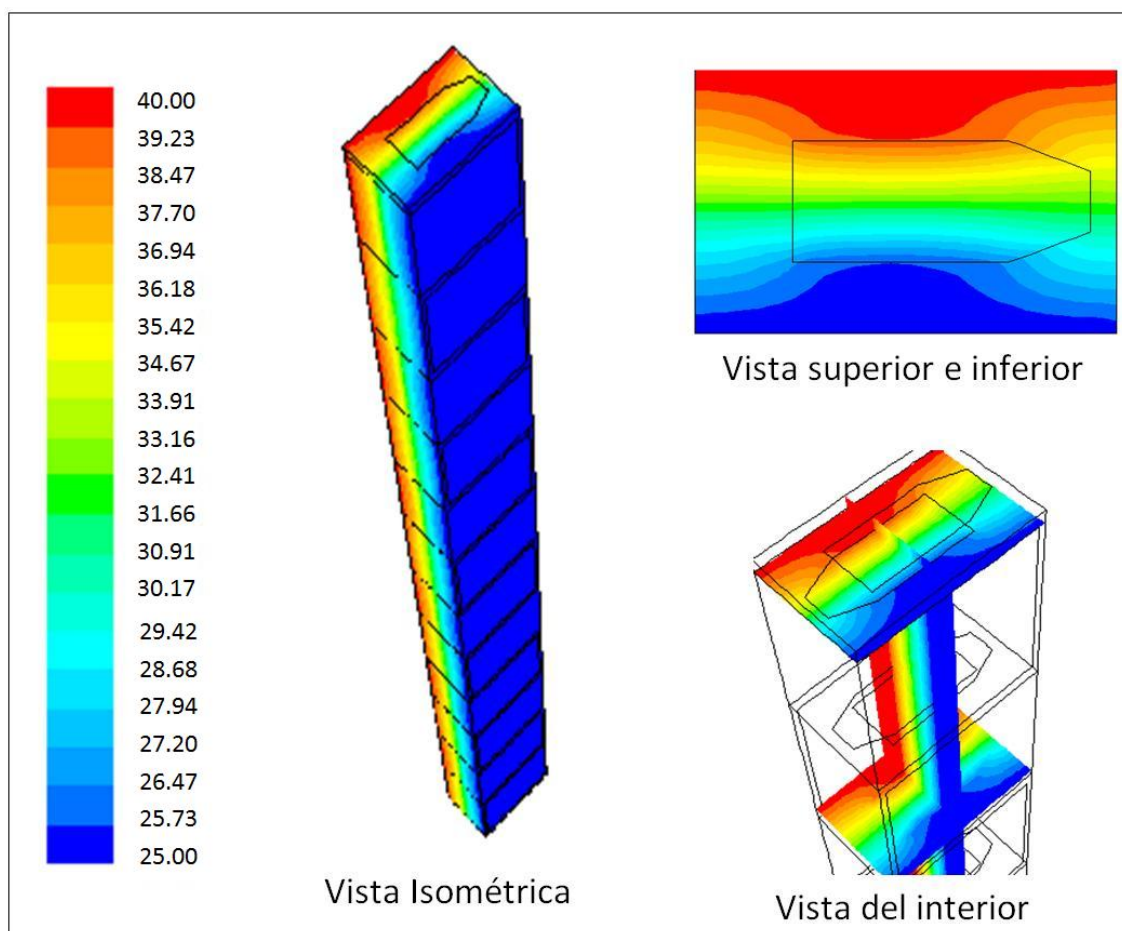


Figura 3.8: Distribución de temperatura en un muro de block de concreto relleno de aislamiento térmico, caso C.

apreciar el comportamiento del flujo de aire dentro del muro. En la figura se detallan dos vistas, la vista frontal (que va por la parte interior de la casa) en la que se aprecia que el flujo desciende. El lado caliente del muro que se encuentra en la parte exterior de la casa se aprecia en la Vista Posterior de la figura. Cerca de la cara externa el flujo asciende mientras aumenta su temperatura de forma gradual. En la parte inferior la temperatura es de  $32^{\circ}\text{C}$ , en la sección intermedia de  $36^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, y en la parte superior del muro alcanza  $39^{\circ}\text{C}$ .

La Tabla 3.2 muestra de forma comparativa los resultados del flujo de calor y resistencia térmica para todos los casos de muros analizados. El peor desempeño corresponde la muro de concreto sin aislamiento con un flujo de  $173 \text{ W/m}^2$ .

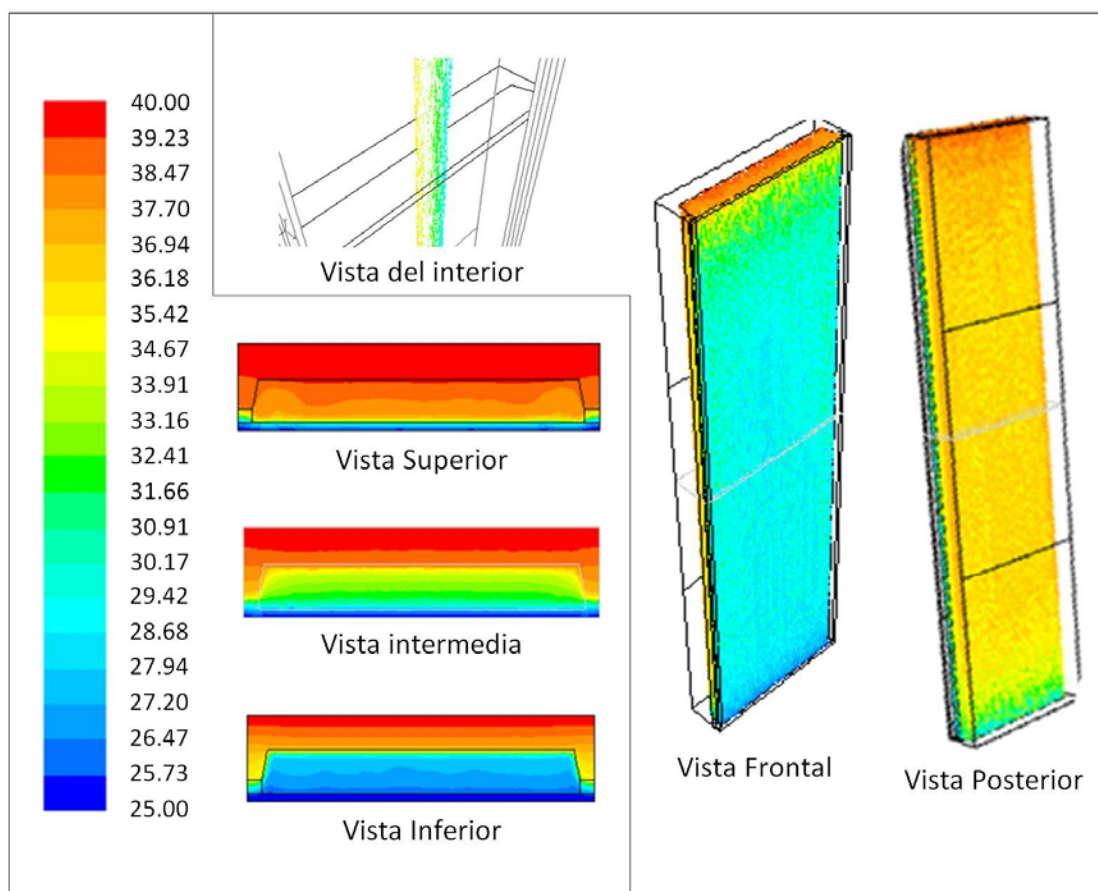


Figura 3.9: Distribución de temperatura y vectores de velocidad para un muro de concreto con cavidades llenas de aire, caso **E**.

Cuando se emplean materiales como el block o el ladrillo el flujo de calor se reduce considerablemente hasta valores de 49 y 47 W/m<sup>2</sup> aproximadamente para el block y ladrillo, respectivamente.

El uso de aislamientos en los muros ayuda a reducir en forma considerable el flujo de calor. Comparando un muro de block con un muro de block con aislamiento en sus cavidades, se tiene que el flujo de calor se reduce aproximadamente en un 15 %. El mejor desempeño corresponde al muro de concreto con aislante térmico R19 y uniones de poliestireno extruido (caso **H**) con un flujo de calor de 4.95 W/m<sup>2</sup>, seguido por el muro de concreto con aislamiento R13 y unión de poliestireno extruido (caso **G**).

Para los muros de concreto-aislamiento en los que hay aislante térmico dentro del muro la reducción del flujo de calor es de aproximadamente 63 % respecto al caso con aire. Por otra parte, si se consideran las uniones con poliestireno extruido, la disminución en el flujo de calor es de 47 % respecto de las uniones de concreto (caso **F-1**) y de 19 % si la unión es de madera (caso **F-2**). La Figura 3.10 ilustra gráficamente los resultados de flujo de calor y resistencia térmica los casos de muros evaluados.

Tabla 3.2: Resultados del análisis de transferencia de calor en los muros.

Caso	Flujo de calor (W/m <sup>2</sup> )	Resistencia Térmica (m <sup>2</sup> K/W)	Resistencia Térmica (ft <sup>2</sup> .hr.°F/BTU)
A.-Concreto sin aislamiento e= 15 cm	173.33	0.086	0.491
B.-Block sin aislamiento	49.66	0.302	1.880
C.-Block con aislamiento	42.01	0.357	2.224
D.-Ladrillo	47.81	0.313	1.781
E.-Concreto sin aislamiento y aire	25.89	0.579	3.289
F.-Concreto-aislante con R10	9.44	1.587	9.015
F-1.-Costilla de concreto	18.02	0.832	4.726
F-2.-Costilla de concreto y 1" de madera	11.78	1.272	7.227
G.-Concreto-aislante con R13	6.68	2.245	12.750
H.-Concreto-aislante con R19	4.95	3.030	17.206

### 3.1.3. Uniones entre muros y techos

#### Unión entre un muro exterior y uno interior

Se estudiaron dos condiciones, el caso **A** corresponde a la unión de un muro de concreto interno con uno externo. En el caso **B** los muros se separaron con una pulgada de XPS. La temperatura en el interior se consideró de 20°C con un coeficiente convectivo de 10 W/m<sup>2</sup> K, y en superficie exterior de 40°C con un coeficiente convectivo de 25 W/m<sup>2</sup> K.

En la Figura 3.11 se muestran los contornos de temperatura para los dos casos estudiados. En el caso **A** la temperatura en la unión con el muro interno alcanza un valor de 27°C, mientras que en el caso **B**, la zona de la unión entre los muros tiene una temperatura de 25°C. Adicionalmente, es posible observar que existe una

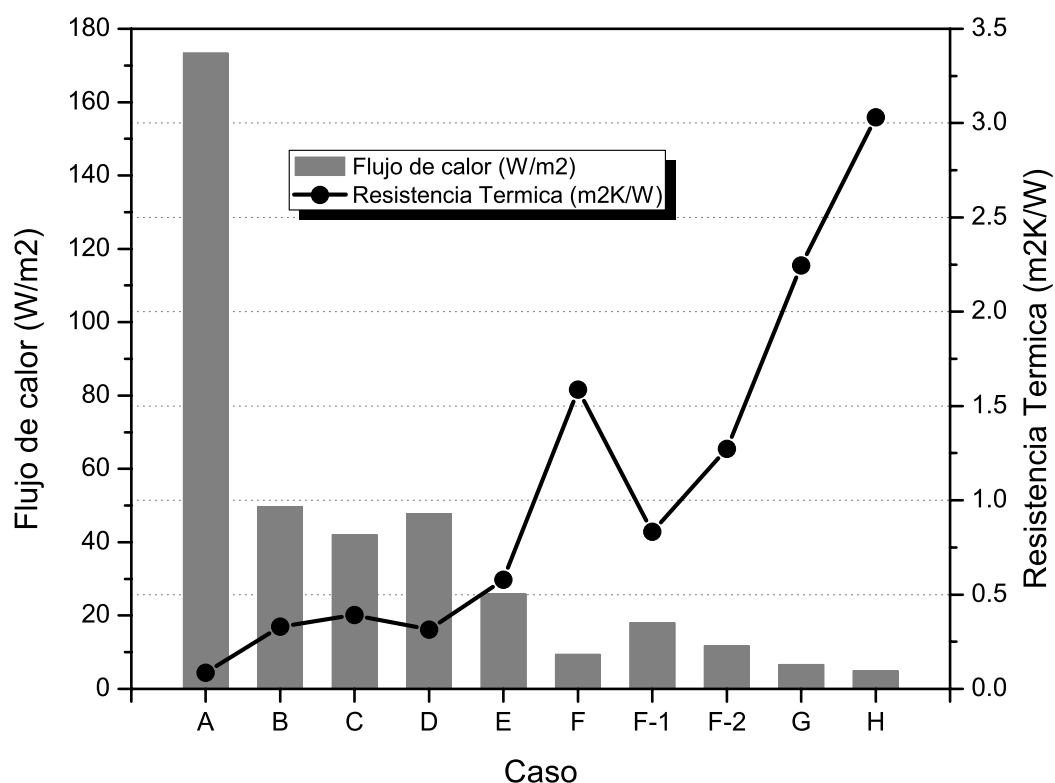
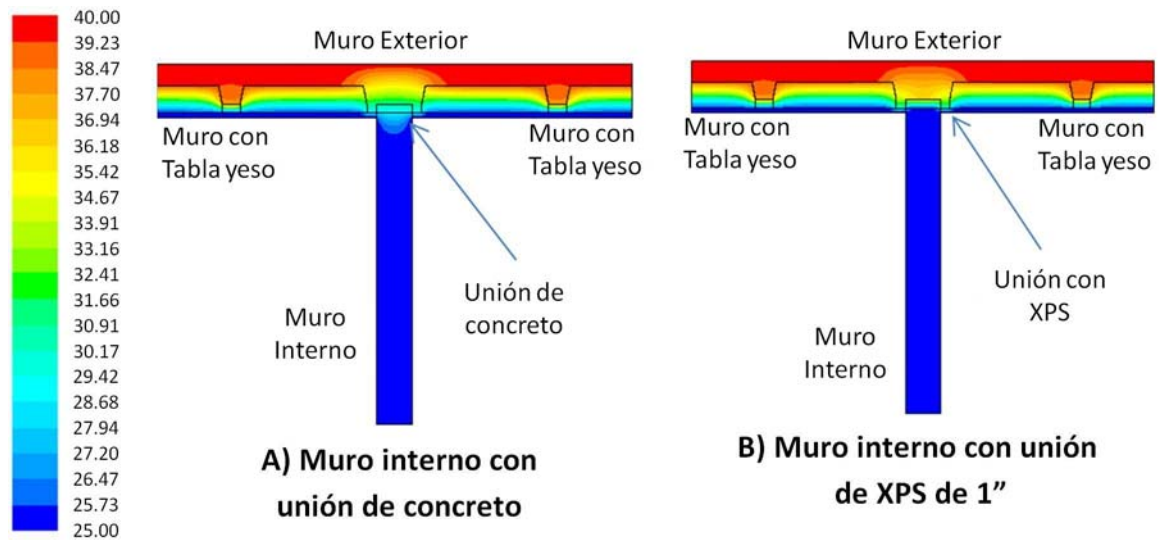


Figura 3.10: Gráfico comparativo del flujo de calor y la resistencia térmica equivalente para los distintos casos de muros analizados.

diferencia entre los contornos de temperatura en el área cerca de la región en la que se unen los muros, esa diferencia se debe que la rotura del puente térmico no facilita la transferencia de calor entre los muros.

En la Figura 3.12 se muestran los perfiles de flujo de calor a lo largo del muro exterior para los dos casos planteados **A** y **B**. Se puede apreciar en cada una de las curvas tiene tres picos que denotan zonas de mayor flujo. Las crestas más pequeñas de los extremos derecho e izquierdo tienen su origen en los puentes térmicos que ocurren en la unión que tiene el muro de concreto con la tabla de yeso. El máximo de la gráfica muestra el flujo de calor en la zona de unión que existe entre el muro interno y el externo. Para el caso **A** el flujo de calor en la unión llega hasta 95



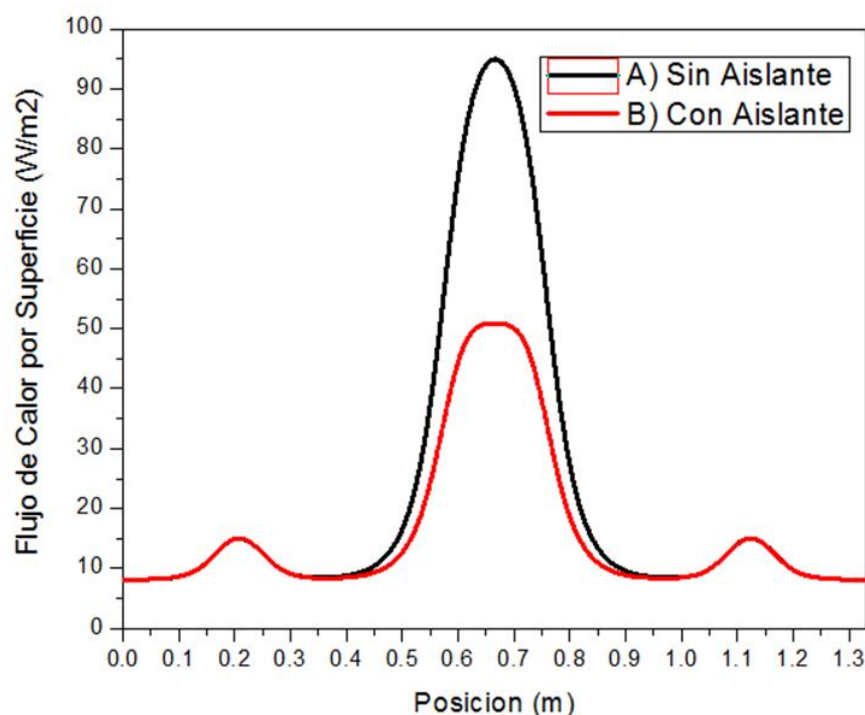


Figura 3.12: Flujo de calor local en la superficie exterior para la unión entre muros externo e interno.

Tabla 3.3: Resultados del calor transferido a través de tres diferentes superficies en el análisis de la unión entre un muro exterior y uno interior.

Superficie de Transferencia de Calor	(A) Sin Aislamiento (W)	(B) Con Aislamiento (W)	Porcentaje de disminución (%)
Muro Exterior	<b>30.27</b>	<b>21.82</b>	<b>27.91</b>
Muro con tabla yeso	16.85	17.80	-5.63
Muro Interno	13.42	4.01	70.11

longitud del aislante a 4.2 m. Para los casos 3 al 6 se incrementó sucesivamente en 0.5 m la longitud del aislante en zona que cubre el techo del cuarto que no está refrigerado. Este análisis es de interés para evaluar la transferencia de calor a través del techo de una casa ya construida donde se desea aislar solamente un cuarto que va a estar refrigerado.

La Figura 3.13 presenta la distribución de temperatura para todos los casos abordados. Para el caso denominado Techo, la temperatura del techo sobre el cuarto

refrigerado es relativamente alta. En el caso 1 cuando el aislante solamente cubre de manera ajustada el techo arriba de la habitación refrigerada, la temperatura superficial del techo del cuarto refrigerado se reduce significativamente. En el caso 2, el aislante cubre las zonas de la unión de los muros además del techo de la habitación refrigerada, y en esta condición la temperatura es aproximadamente  $31^{\circ}\text{C}$ , menor a los  $36^{\circ}\text{C}$  que se tenían en el caso anterior. En los casos 3 al 6, donde el aislante es colocado sobre el techo y se extiende medio metro sucesivamente en cada caso más allá del techo del cuarto, se observa que la temperatura del techo se reduce con el aumento de las dimensiones del aislante térmico.

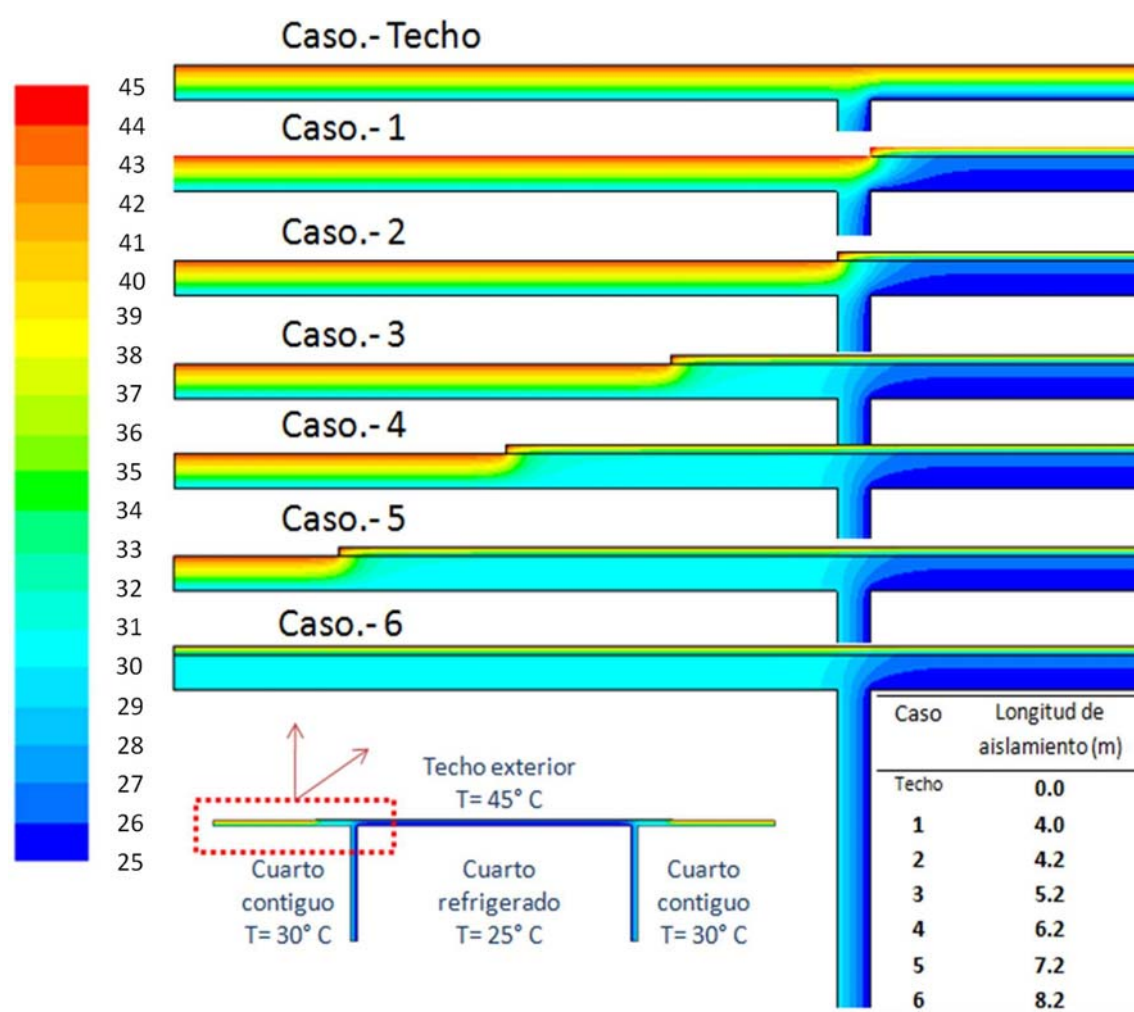


Figura 3.13: Contornos de temperatura para la unión de techo con paredes de habitaciones contiguas.



Los resultados numéricos de este análisis se detallan en la Tabla 3.4. La columna llamada *Todo el techo* se refiere a la transferencia de calor en toda la superficie que incluye el área del cuarto refrigerado y los no refrigerados, esta columna permite apreciar el descenso en el calor transferido en los diferentes casos estudiados debido al efecto de la extensión del aislante. La columna *Techo de cuartos contiguos* representa la transferencia de calor por el techo de los cuartos que se encuentran sin refrigeración a 30°C. *Techo de cuarto de estudio* indica la ganancia de calor del cuarto que se encuentra refrigerado; de acuerdo a los valores en la tabla la máxima reducción en la transferencia de calor es para el caso 3. En los casos 4 al 6 el aumento en el área del aislante del techo ya no reduce la transferencia de calor hacia la habitación refrigerada. La ventaja obtenida es la reducción de la carga térmica al cuarto de refrigerado que ocurre por la disminución de calor transferido el techo y los muros.

Tabla 3.4: Resultados del análisis de la transferencia de calor en la unión del techo con las paredes de habitaciones contiguas.

Caso	Todo el techo (W)	Techo de cuartos contiguos (W)	Techo del cuarto de estudio (W)	Muros del cuarto de estudio (W)	Todo el cuarto de estudio (W)	Ahorro para el cuarto de estudio (%)
Techo	1858.32	782.54	1047.98	275.29	1323.27	0
1	923.35	781.82	117.12	272.95	390.07	70.79
2	883.75	774.86	96.53	266.39	362.92	72.55
3	702.75	610.21	<b>89.85</b>	<b>262.35</b>	<b>352.20</b>	<b>73.36</b>
4	523.12	430.90	89.85	262.35	352.20	73.36
5	343.80	251.57	89.85	262.35	352.20	73.36
6	<b>149.95</b>	<b>57.73</b>	89.85	262.35	352.20	73.36

### 3.1.4. Estudio de ventanas

En esta etapa del trabajo se evaluó el beneficio en la reducción de la ganancia térmica que se obtiene con el uso de filtros solares comercialmente disponibles. Para ello se construyó un modelo físico sencillo que permitió cuantificar el calentamiento que sufre un cuerpo expuesto a la radiación solar que atravieza un acristalamiento típico. De manera simultánea se evaluó la ganancia de calor que sufre el cuerpo cuando el acristalamiento cuenta con diferentes tipos de filtros solares.



Como se comentó en el Capítulo 2, las paredes del modelo fueron construidas con poliestireno extruido (XPS) para aislar térmicamente el cuerpo expuesto a la radiación solar. Dentro de cada una de las cavidades se instaló una placa de aluminio con dimensiones  $43 \text{ mm} \times 51 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$  pintada con un con esmalte color negro mate.

Para calcular el calor que gana un cuerpo expuesto a la radiación solar que atraviesa el acristalamiento, en el experimento se estimó el calor que gana la placa al exponerse a la radiación solar. Para ello consideramos que todo el calor que gana la placa se manifiesta como un aumento en la temperatura. La ecuación de la conservación de la energía establece que

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}, \quad (3.5)$$

ecuación también conocida como primera ley de la termodinámica, donde  $\dot{Q}$  es el calor transferido al sistema por unidad de tiempo,  $\dot{W}$  es el trabajo por unidad de tiempo que hace el sistema,  $E$  es la energía del sistema y  $t$  es el tiempo.

Si consideramos que el sistema es la placa de aluminio, ésta no hace trabajo, además, si suponemos que el único intercambio de calor que tiene la placa es debido a la radiación solar, entonces

$$\dot{Q} = \frac{dE}{dt} \quad (3.6)$$

Esta última suposición será válida si toda la energía que recibe la placa por radiación solar se acumula y manifiesta como un aumento en su temperatura. Para ello la placa no debería transferir energía al medio ambiente. En ese caso:

$$\dot{Q} = \frac{d}{dt} (\rho c_p T) \quad (3.7)$$

donde  $\rho$  es la densidad y  $c_p$  el calor específico del material de la placa.

El calor específico y la densidad son función de la temperatura de la placa por lo que podrían cambiar durante el experimento, sin embargo, si en el experimento el cambio de la temperatura no es demasiado grande podemos suponer que ambas propiedades son constantes, y en ese caso

$$\dot{Q} = \rho c_p \frac{dT}{dt} \quad (3.8)$$


---

Entonces en este experimento hay que medir la razón de cambio de la temperatura de la placa con el tiempo, pero hay que hacerlo siguiendo las hipótesis ya planteadas para poder usar el modelo simple de la Ec. 3.8. El experimento debe realizarse en un corto tiempo para que la placa no tenga oportunidad de transferir el calor que ha ganado debido a la radiación solar. Esto implica que la placa debe aumentar su temperatura muy rápidamente, además, el experimento debe concluir antes de que la placa incremente su temperatura de forma considerable, esto con el fin de evitar que la placa pierda calor por radiación. Para lograr esa meta se propuso el uso de un cuerpo con muy poca inercia térmica. La opción fue emplear una lámina muy delgada de aluminio que no tuviera contacto físico con nada excepto con un termopar que registre su temperatura con una alta resolución temporal.

El experimento consistió en medir el aumento de la temperatura de la placa cuando queda expuesta a la radiación solar. La frecuencia de muestreo de la temperatura de todas las placas fue de un dato cada segundo. Para poder comparar la reducción de la ganancia de calor debida al uso de filtros solares se llevó a cabo de manera simultánea la medición de la razón de cambio de la temperatura de cinco láminas idénticas, todas expuestas al mismo tiempo a la radiación solar, pero cada una de ellas detrás de vidrios protegidos por distintos filtros solares. El experimento se realizó en dos ocasiones.

La Figura 3.14 muestra el cambio de la temperatura con el tiempo momentos después de que quedan expuestas a la radiación solar las cinco placas bajo prueba. En estos primeros instantes es claro que existe un comportamiento lineal entre la temperatura y el tiempo. Las pendientes de esas rectas son la razón de cambio de  $T$ , es decir  $dT/dt$ . Es evidente que el valor de  $dT/dt$  es prácticamente constante en el inicio del experimento, mismo que corresponde a los instantes en los que la placa no ha tenido oportunidad de rechazar el calor ganado.

Una vez que conocemos  $\dot{Q}$ , podemos estimar el calor que atraviesa el acristalamiento por unidad de área como:

$$q_c'' = \frac{\dot{Q}}{A_p} \quad (3.9)$$

donde  $A_p$  es el área de la placa de aluminio instrumentada.

---

Adicionalmente, podemos comparar los beneficios del uso de los filtros por medio del cociente que resulta de dividir el flujo de calor que atraviza el acristalamiento con un cierto filtro  $q''_c$ , con el flujo de calor para un acristalamiento sin filtro alguno  $q''_{c,ref}$ .

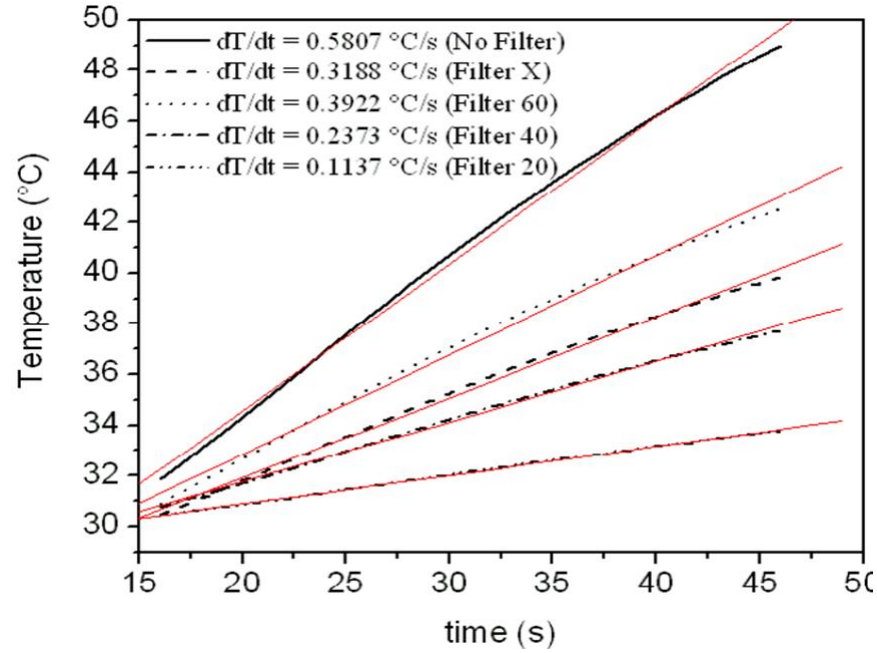


Figura 3.14: Gráficas de las temperaturas de las láminas instrumentadas en función del tiempo momentos después de que quedan expuestas a la radiación solar. El experimento inició a las 11:54 am.

Con fines ilustrativos se presenta la Figura 3.15. En ella se muestran dos gráficas, una para cada una de las pruebas, en las que se se puede observar el proceso de calentamiento de las placas. Como puede verse, el cambio en la temperatura es más intenso al inicio de la prueba. Posteriormente la rapidez de cambio es menor, esto como consecuencia de la transferencia de calor de la placa al medio que lo rodea. El comportamiento de la temperatura con el tiempo es asintótico hacia el valor de temperatura para la cual la placa rechaza la misma cantidad de calor que recibe. De toda la información obtenida en el experimento, solo la que corresponde al inicio es útil para nuestro análisis.

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados obtenidos para los cinco casos analizados en los dos experimentos. Los valores de  $dT/dt$  se obtuvieron mediante

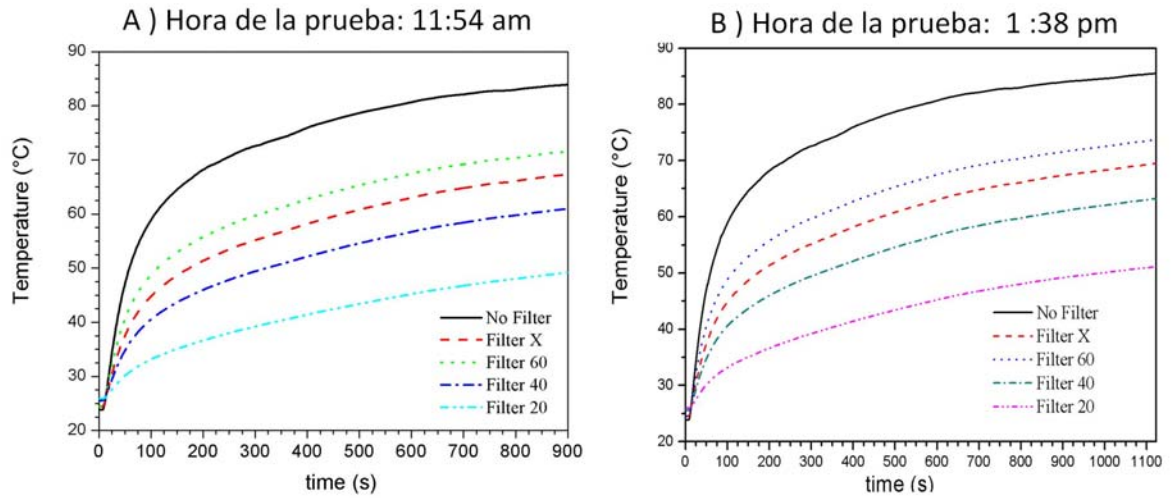


Figura 3.15: Temperatura en la superficie de cada placa de aluminio en dos horarios de prueba.

la derivación numérica de los datos mostrados la Figura 3.14, en tanto que  $q$  y  $q''$  se obtuvieron a partir de aplicar las Ecuaciones 3.8 y 3.9, respectivamente. En la cuarta columna de cada medición se presenta la relación  $q''_c/q''_{c,ref}$ , en donde el caso  $NF$  que corresponde al caso en el que no se usa filtro es el que se emplea como valor de referencia. Los filtros reportados son cuatro, un filtro solar comercial identificado como  $FX$  además de tres filtros solares comerciales de la firma Hüper Optik, serie Ceramic de cédula 60, 40 y 20, mismos que en la Tabla 3.5 se identifican como  $F60$ ,  $F40$  y  $F20$ , respectivamente. Como se puede ver en la Tabla 2.3 los valores numéricos de la cédula de la serie Ceramic indican de forma aproximada el porcentaje de transmisión de luz visible de tales filtros. Los resultados de esta prueba muestran una buena comparación entre los valores porcentuales de  $q''_c/q''_{c,ref}$  de la Tabla 3.5 y con los los porcentajes de transmisión de luz visible nominal de los tres filtros analizados de la serie Ceramic.

Finalmente, es importante comentar que como en general los filtros oscurecen la apariencia de los acristalamientos y disminuyen la visibilidad a través de éstos. Por tal motivo, la selección de un filtro en ocasiones también obedece a fines estéticos, de seguridad o comerciales. En establecimientos comerciales por ejemplo los ventanales se utilizan para mostrar mercancía y lo que se busca es la mayor visibilidad que se

pueda para los productos y a pesar de las vetajas que representa el uso de filtros, éstos no son considerados como una opción atractiva por los usuarios.

Tabla 3.5: Resultados del análisis de la ganancia de calor de un cuerpo que es expuesto a la radiación solar que atraviesa un acristalamiento protegido con distintos filtros solares.

Caso	Medición 1 (11:54 am)				Medición 2 (1:38 pm)				Promedio de ( $q''/q''_{ref}$ ) Medición 1 y 2
	$dT/dt$	$q$ (W)	$q''$ (W/m <sup>2</sup> )	( $q''/q''_{ref}$ )	$dT/dt$	$q$ (W)	$q''$ (W/m <sup>2</sup> )	( $q''/q''_{ref}$ )	
<i>NF</i>	0.581	0.459	264.797*	100 %	0.632	0.499	288.098*	100 %	100.00 %
<b><i>FX</i></b>	<b>0.319</b>	<b>0.252</b>	<b>145.372</b>	<b>55 %</b>	<b>0.346</b>	<b>0.273</b>	<b>157.638</b>	<b>55 %</b>	<b>54.81 %</b>
<i>F60</i>	0.392	0.310	178.842	68 %	0.426	0.336	194.072	67 %	67.45 %
<i>F40</i>	0.237	0.187	108.208	41 %	0.251	0.198	114.501	40 %	40.30 %
<i>F20</i>	0.114	0.900	51.847	20 %	0.115	0.091	52.531	18 %	18.91 %

\*Valor de referencia,  $q''_{ref}$

## 3.2. Simulación de una casa típica

Los resultados que se han obtenido por separado para muros, techos y ventanas, ahora deben ser considerados de forma conjunta como un sistema dinámico en el que todos ellos interactúan. La casa habitación es el sistema en cuestión y la respuesta dinámica que ésta tiene ante las excitaciones externas ejercidas por las condiciones climáticas y el sistema de acondicionamiento de aire resulta complicada de analizar. Por esa razón se recurrió al uso de un simulador computacional desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos llamado Energy-Plus.

Para realizar una simulación el Energy-Plus debe contar con la información de la geometría y dimensiones del recinto, la orientación, propiedades termofísicas de los materiales de construcción, incluyendo la resistencia térmica equivalente de los elementos de la envolvente, además, se le debe relacionar con la base de datos que contiene la información del clima en la ubicación geográfica de interés como temperatura y humedad ambiental, radiación solar y velocidades del viento. Adicionalmente hay que incluir las prácticas de operación del sistema de acondicionamiento de aire y las cargas térmicas internas que se requiera considerar.

Los resultados que se presentan en este trabajo corresponden al comportamiento de las cargas térmicas de la casa 3 mostrada en la Figura 2.16. En este estudio se analizaron tres aspectos :

A) Ubicación, considerando las tres posibilidades.

B) Orientación, incluyendo las cuatro principales: Norte, Sur, Este y Oeste.

C) Aislamiento térmico, donde se consideraron los casos cuyos arreglos se describen en la Tabla 2.4.

A continuación se muestran los resultados para los estudios **A**, **B** y **C**.

### 3.2.1. Ubicación y orientación

Para poder evaluar los efectos de la ubicación y la orientación de la casa de una forma objetiva es necesario considerar que la casa no cuenta con ningún tipo de aislamiento térmico. Los resultados obtenidos para los casos de estudio **A**, **B** y **C** se muestran en la Tabla 3.6, en donde se pueden visualizar los resultados correspondientes a las combinaciones de las cuatro orientaciones cardinales y las tres posiciones consideradas para la casa. Se observa que en general la posición centrada es la que tiene menor carga térmica.

Cuando la posición de la casa está del lado izquierdo la menor ganancia de calor está se presenta al estar orientada al Norte, seguida en orden ascendente por la orientación Sur, Oeste y Este. Para la posición centrada, la serie en orden ascendente de carga térmica es Norte, Sur, Este y Oeste. Por último para la posición de la casa a la derecha la menor carga térmica ocurre para la casa con orientación es hacia el Sur, seguida en orden ascendente por las orientaciones al Norte, Este y Oeste.

Tabla 3.6: Resultados obtenidos para ganancia de calor anual a través de la envolvente de la casa analizada atendiendo a su ubicación y orientación.

Orientación	Posición Izquierda (kWh)	Posición Centrada (kWh)	Posición Derecha (kWh)
Norte	9629.105	8585.395	9762.246
Sur	9860.934	8656.526	9355.513
Este	<b>10340.070</b>	9293.048	9886.428
Oeste	10041.380	<b>9512.312</b>	<b>10388.170</b>

En la Figura 3.16 se ilustra por medio de gráficas de pastel la distribución porcentual del ingreso de calor en un año a través de los distintos elementos de la envolvente de la casa 3. Se observa que la mayor parte de la ganancia de calor ocurre a través de los techos (cubiertas) y muros representando alrededor del 30 %

y 40 %, respectivamente, del total de la carga. La conducción de calor en puertas y ventanas es del orden del 1 % cada una de ellas. La otra gran parte de la carga se debe a la radiación de calor a través de las ventanas, misma que llega a representar cerca del 30 % del total.

En los gráficos anteriores se puede observar que la carga térmica en los muros supera la correspondiente al techo, sin embargo, la carga en los muros no es homogénea, hay muros que reciben más carga que otros. Por conveniencia los elementos de la envolvente se clasificaron en cinco grupos, el primero corresponde a los techos y los cuatro restantes a los muros. Los grupos de los muros están referidos de acuerdo a la visión que tendría un individuo dentro de la casa que mira hacia la fachada principal; los cuatro grupos son: frontal, posterior, izquierda y derecha.

En la Tabla 3.7 se pueden apreciar los resultados de las cargas térmicas que corresponde a cada uno de los grupos para la casa 3 en los tres tipos de posición y las cuatro posibles orientaciones en una semana de verano. Por su parte, la Figura 3.17 ilustra mediante gráficas de pastel la distribución porcentual de la carga térmica que le corresponde a cada uno de los grupos de la envolvente de la casa 3 en la misma semana. Cabe mencionar que para el caso de la posición derecha con una orientación hacia el sur, la carga en el muro izquierdo superó a la del techo; un caso semejante ocurre en el muro izquierdo para el caso de la posición derecha y orientación Norte. En la Tabla 3.7 los números resaltados con letras negritas se indican la máxima carga en cada posición y orientación.

En ocasiones la carga térmica a través de un cierto muro es mayor que la del techo. Esto llega a ocurrir cuando el área del muro en cuestión es muy grande. Por esta razón es conveniente cuantificar la carga térmica por unidad de área para cada uno de los elementos de la envolvente de la casa. La Tabla 3.8 muestra las áreas que corresponden a los cinco grupos de la envolvente de la casa analizada. Al dividir el valor de las cargas entre sus áreas correspondientes es posible determinar el flujo de calor (calor transferido por unidad de área) en cada uno de los grupos de la envolvente.

En la Tabla 3.9 se muestra el calor transferido por unidad de área en cada uno de los grupos de la envolvente para cada una de las posibles combinaciones de posición y orientación de la casa 3. Los valores en letras negritas indican el grupo con mayor carga térmica por unidad de superficie. Se observa que el muro izquierdo es, en la

---



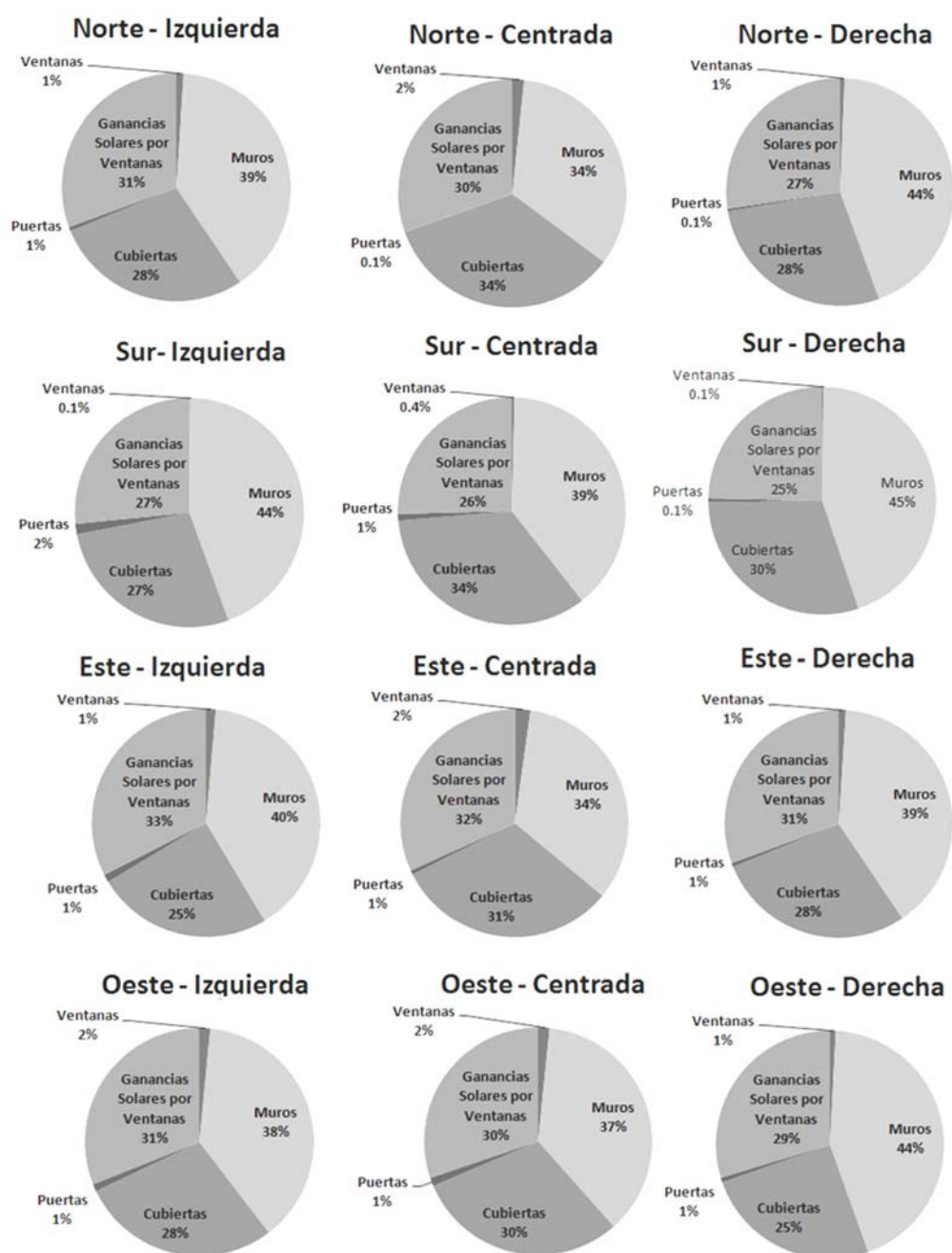


Figura 3.16: Gráficos de pastel para distribución de la ganancia de calor anual en los componentes de la envolvente de la casa 3. Se muestran todas las combinaciones posibles de orientación y posición.



Tabla 3.7: Resultados de la carga térmica en los techos y muros, de acuerdo a su orientación. Los datos corresponden a la semana del 27 julio al 2 de agosto.

Calor transferido por superficie (kWh/m <sup>2</sup> )						
Posición	Orientación	Frontal	Posterior	Izquierda	Derecha	Techo
Izquierda	Norte	57.16	50.52	96.31	<b>148.20</b>	155.99
	Sur	54.64	52.48	86.50	<b>105.59</b>	155.53
	Este	89.80	<b>94.95</b>	78.93	81.63	153.95
	Oeste	<b>104.10</b>	84.75	80.56	86.54	153.12
Centrada	Norte	57.63	52.88	<b>115.21</b>	91.85	159.32
	Sur	56.34	53.97	108.72	<b>109.53</b>	158.45
	Este	<b>90.86</b>	90.40	75.04	71.55	156.48
	Oeste	86.71	79.02	<b>95.34</b>	71.58	156.05
Derecha	Norte	56.79	50.10	<b>*183.77</b>	80.17	156.59
	Sur	55.90	53.63	<b>*159.39</b>	85.17	157.41
	Este	89.53	<b>95.08</b>	94.21	73.43	154.05
	Oeste	<b>104.62</b>	81.06	88.64	74.36	154.26

\*Supera los kWh del techo

Tabla 3.8: Dimensiones de las superficies de la casa # 3.

M. Frontal	M. Derecha	M. Posterior	M. Izquierda	Techo
25.58 m <sup>2</sup>	36.98 m <sup>2</sup>	25.09m <sup>2</sup>	40.17 m <sup>2</sup>	45.15 m <sup>2</sup>

mayoría de los casos, el muro con mayor transferencia de calor por unidad de superficie y en ocasiones supera al techo.

### 3.2.2. Aislamiento

El estudio del efecto del uso de aislamiento térmico se llevó a cabo considerando la aplicación de fibra de vidrio como aislante. Los casos analizados son los que están definidos en la Tabla 2.4. Los resultados detallados para la casa 3 con orientación norte y posición centrada se muestran en la Tabla 3.10. Allí se presenta, para cada caso, el calor extraído en un año del interior de la casa 3, i.e. el calor que debe extraer el sistema de acondicionamiento de aire para mantener las condiciones de confort. Además, se incluye el área de la superficie que se ha aislado, el volumen de fibra de vidrio que es necesario emplear y el porcentaje de reducción en la carga térmica que resulta respecto a la casa que no cuenta con aislamiento térmico.

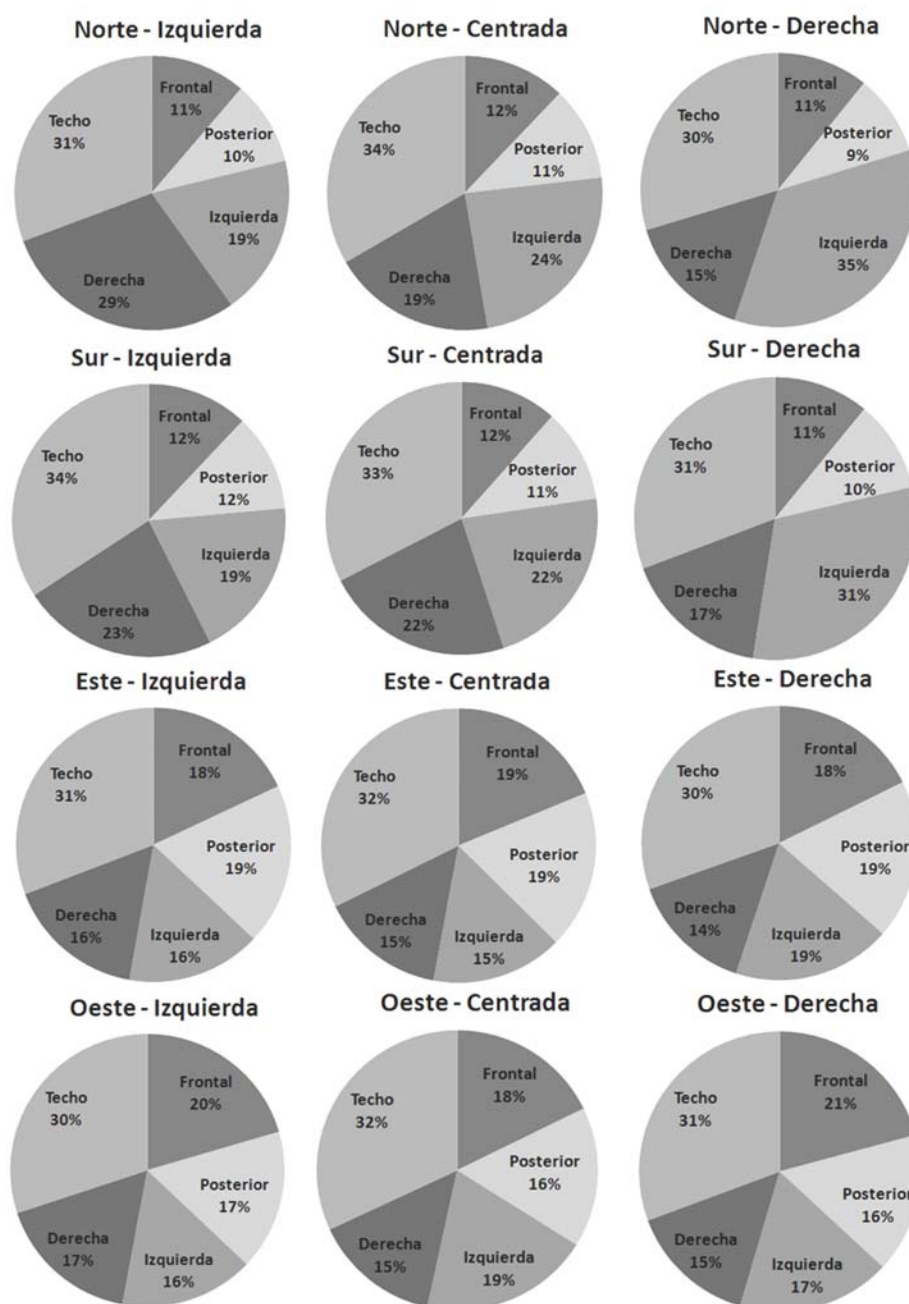


Figura 3.17: Gráficos de pastel de la ganancia de calor en una semana de verano para muros frontales, posteriores, izquierda, derecha y techo. Se muestran las distintas combinaciones de orientación y ubicación.

Tabla 3.9: Carga térmica por unidad de superficie para los cinco grupos de la envolvente de la casa 3. Los datos corresponden a la semana del 27 julio al 2 de agosto.

		Calor transferido por metro cuadrado de superficie (kWh/m <sup>2</sup> )				
Posición	Orientación	Frontal	Posterior	Izquierda	Derecha	Techo
Izquierda	Norte	2.23	1.37	<b>3.84</b>	3.69	3.45
	Sur	2.14	1.42	<b>3.45</b>	2.63	3.44
	Este	<b>3.51</b>	2.57	3.15	2.03	3.41
	Oeste	<b>4.07</b>	2.29	3.21	2.15	3.39
Centrada	Norte	2.25	1.43	<b>4.59</b>	2.29	3.53
	Sur	2.20	1.46	<b>4.33</b>	2.73	3.51
	Este	<b>3.55</b>	2.44	2.99	1.78	3.47
	Oeste	3.39	2.14	<b>3.80</b>	1.78	3.46
Derecha	Norte	2.22	1.35	<b>7.32</b>	2.00	3.47
	Sur	2.19	1.45	<b>6.35</b>	2.14	3.49
	Este	3.50	2.57	<b>3.75</b>	1.83	3.41
	Oeste	<b>4.09</b>	2.19	3.53	1.85	3.42

La Figura 3.18 muestra de forma comparativa mediante gráfica de barras la información contenida en la Tabla 3.10. El gráfico está dividido en tres secciones, la primera de ellas corresponde a los casos con aislamiento aplicado en techos, la segunda a los casos con aislamiento en muros, y la tercera a los casos con aislamiento en la totalidad de muros y techos. En la figura se puede observar que si se cubre el techo con aislante R19 ó R30, casos LR19 y LR30, se requiere de menor enfriamiento respecto al demandado cuando se aíslan todos los muros. También muestra el gráfico que aplicar aislante R13 en el techo resulta, al menos en apariencia, equivalente a emplear aislante R5 en los muros izquierdo y derecho.

Para llevar a cabo la selección de la opción más conveniente, además de considerar la disminución de la carga térmica en el recinto, hay que evaluar la cantidad de material que se necesita aplicar. La Figura 3.19 presenta un comparativo del enfriamiento sensible requerido en un año en la casa 3 con orientación norte y posición centrada, incluyedo el volumen de fibra de vidrio que se debe aplicar como aislante térmico. Una de las mejores opciones para ésta casa consiste en aislar todos los muros y el techo con material R5, i.e. emplear la opción TR5. Con esa opción se puede lograr un ahorro en el enfriamiento sensible del 54.3 % al aplicar un volumen

Tabla 3.10: Enfriamiento sensible requerido en un año para la casa 3 aislada con fibra de vidrio, con orientación norte y posición centrada. Se incluyen los valores de la superficie aislada y el volumen de fibra de vidrio necesario para hacerlo.

Nomen- clatura	Tipo de aislamiento	Enfriamiento sensible (kWh)	Área aislada (m <sup>2</sup> )	Volumen aislante (m <sup>3</sup> )	Ahorro respecto al caso Base
Base	Sin aislamiento	8585.4	0	0	0.0 %
LR5	Techo con R5	7146.3	45.15	1.715	16.8 %
LR10	Techo con R10	6876.5	45.15	3.431	19.9 %
LR13	Techo con R13	6826.5	45.15	4.018	20.5 %
LR19	Techo con R19	4959.6	45.15	7.178	42.2 %
LR30	Techo con R30	4819.9	45.15	10.881	43.9 %
FPR5	Muros fron.y pos.con R5	7131.9	50.67	1.925	16.9 %
FPR8	Muros fron.y pos.con R8	6996.1	50.67	3.242	18.5 %
IDR5	Muros izq. y der.con R5	6670.1	77.15	2.931	22.3 %
IDR8	Muros izq. y der.con R8	6468.0	77.15	4.937	24.7 %
MR5	Todos los Muros con R5	5485.0	127.82	4.857	36.1 %
MR8	Todos los Muros con R8	5101.9	127.82	8.180	40.6 %
R5,R10	Muros R5, Techo R10	3592.5	172.97	8.288	58.2 %
R5,R13	Muros R5, Techos R13	3531.1	172.97	2.875	58.9 %
R8,R10	Muros R8, Techo R13	3193.7	172.97	11.611	62.8 %
R8,R13	Muros R8, Techos R13	3078.4	172.97	12.198	64.1 %
TR5	Todo Aislado con R5	3923.9	172.97	6.572	54.3 %
TR10	Todo Aislado con R10	3070.2	172.97	13.145	64.2 %
TR13	Todo Aislado con R13	2892.8	172.97	15.394	66.3 %

de 6.5 m<sup>3</sup> de fibra de vidrio. Entre las opciones menos convenientes se encuentra el uso de aislamiento R30 en el techo. Para este último, se requiere aplicar cerca de 11 m<sup>3</sup> y para obtener un ahorro de 43 %. Otro ejemplo de material mal empleado sería aplicar 8 m<sup>3</sup> de fibra de vidrio para aislar todos los muros con R8 y lograr un ahorro del 41 %. La misma cantidad de material se puede utilizar para aislar todos los muros con R5, los techos con R10 y lograr un ahorro del 58 %.

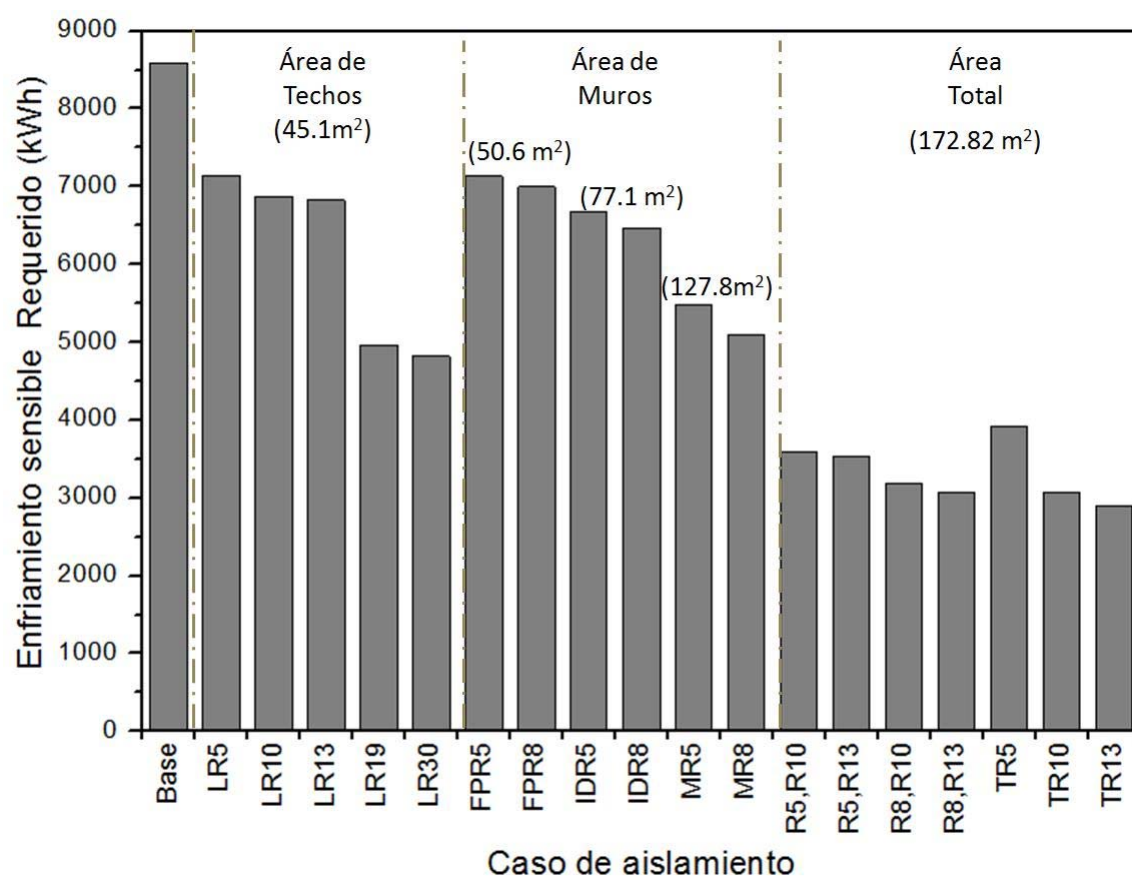


Figura 3.18: Gráfico de enfriamiento sensible requerido en un año para la casa 3 con orientación norte y posición centrada.

### 3.3. Generalización de resultados para casas típicas

La Figura 2.17 muestra los casos estudiados para generar una base de datos que permita la generalización de los resultados al incluir los principales aspectos relacionados con las cargas térmicas de los elementos de la envolvente. Las simulaciones consideraron las cargas térmicas que tiene el recinto como resultado de su interacción con el medio que lo rodea. El diseño de experimentos se aplicó a cada uno de los seis modelos de casa que se muestran en la Figura 2.16. La estrategia para evaluar de manera generalizada el comportamiento de los modelos de casas típicas permite determinar la carga total de calor que experimenta una casa de dimensiones

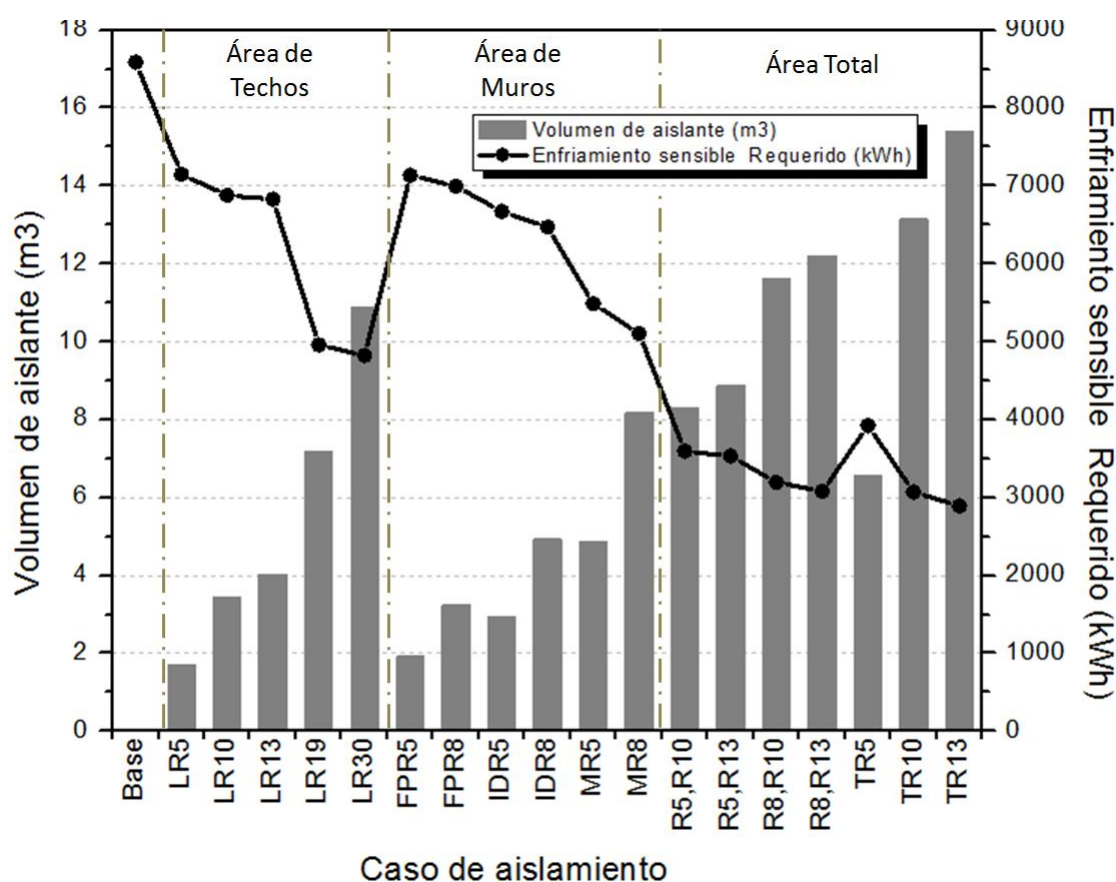


Figura 3.19: Gráfico comparativo del enfriamiento sensible requerido en un año y el volumen de fibra de vidrio aplicado para las distintas opciones de aislamiento térmico. Los datos corresponden a la casa 3 con orientación al norte y posición centrada.

dadas. La estrategia para lograr la generalización incluye el cálculo de un valor característico del flujo de calor, i.e. calor por unidad de área, para cada uno de los elementos de la envolvente, para cada mes del año, y para los seis modelos de casa. Estos análisis generan información como la mostrada en la Tabla 3.9 que se almacena en una base de datos. Una vez que se conocen los valores característicos es posible conocer la carga térmica de todo el recinto al multiplicar dichos valores por las áreas de las superficies de toda la envolvente. Mediante la aplicación de esta estrategia es posible estimar el comportamiento de casas habitación de dimensiones hasta cierto punto arbitrarias. La exactitud de los valores estimados mediante esta metodología depende en gran parte de la cantidad de casas estudiadas y de la semejanza que

tiene el modelo de la casa en particular respecto a aquellas que se emplearon para la elaboración de la base de datos.

### 3.3.1. Exactitud de la metodología

La metodología presentada es muy conveniente para su uso práctico en el cálculo del enfriamiento sensible requerido en casas habitación típicas de la región noreste de México, sin embargo, hay que conocer el grado de certeza que podemos esperar de ésta. A continuación se estima la exactitud de los resultados en que se obtienen mediante la aplicación de la metodología de generalización de resultados.

En este trabajo de tesis se llevó a cabo el análisis de un total de 1224 casos diferentes. En ellos se consideraron:

- Seis modelos distintos de casas
- Posición de la casa
- Orientación
- Tiempo de refrigeración
- Tipo de aislamiento térmico

De la totalidad de los casos analizados, se hizo un estudio estadístico tomando una muestra de 857 casos, 568 que consideran el uso de aislamiento térmico y 289 casos sin aislamiento. Para el análisis de la exactitud, se aplicó la metodología propuesta a los 857 casos. Después, los resultados calculados con la metodología se compararon con los resultados obtenidos mediante la simulación computacional, i.e. los datos numéricos que dieron origen a los valores característicos empleados en la metodología propuesta. La información que nos interesa está en los valores absolutos de las diferencias entre los resultados obtenidos mediante la simulación y los que se calcularon usando la metodología, es decir:

$$|dif| \% = \frac{Resultado_{simulador} - Resultado_{calculado}}{Resultado_{simulador}} \times 100 \quad (3.10)$$

En la Tabla 3.11 presenta la distribución de frecuencia y la frecuencia acumulada de las diferencias entre los resultados del simulador y los obtenidos con la metodología

---



propuesta para el cálculo del enfriamiento sensible requerido en un año para mantener las condiciones de confort. En esta tabla se eligieron intervalos de 5 % para  $|dif|$  %. De la tabla observamos que de las 857 simulaciones realizadas, 366 se encuentran en un rango de 5 % de diferencia. También se puede apreciar en la frecuencia relativa acumulada que la probabilidad de obtener un valor con una diferencia menor al 20 % es aproximadamente del 80 %. La tabla nos permite conocer la confiabilidad que podemos esperar de la metodología presentada en este trabajo.

Tabla 3.11: Tabla de distribución de frecuencia y frecuencia relativa acumulada para las diferencias entre los resultados del simulador y los calculados con la metodología para el enfriamiento sensible requerido en un año.

$ dif $ %	Frecuencia	Frecuencia relativa acumulada
5	366	42.7 %
10	184	63.9 %
15	102	75.8 %
20	84	85.6 %
25	38	90.1 %
30	20	92.4 %
35	19	94.6 %
40	23	97.3 %
45	13	98.8 %
50	2	99.1 %
55	2	99.3 %
60	3	99.6 %
65	3	100.0 %
Total	857	

Llevando a cabo el análisis estadístico de los valores de toda la muestra se encuentra que la media aritmética es 10.53 %, la mediana de 5.57 % y la moda de -4 %. La desviación media es de 8.14 % y la desviación estándar es de 10.9 %. En la Figura 3.20 se muestra el histograma de frecuencias para la diferencia entre los valores obtenidos del simulador y los calculados con la metodología.

Se ha presentado ya el análisis estadístico que permite evaluar la confiabilidad de los resultados obtenidos con la metodología para el enfriamiento sensible requerido. Adicionalmente, resulta atractivo conocer la confiabilidad que tiene la metodología para la evaluación de los beneficios del uso de los aislamientos térmicos, es decir, la confiabilidad para el cálculo del ahorro del enfriamiento sensible requerido para



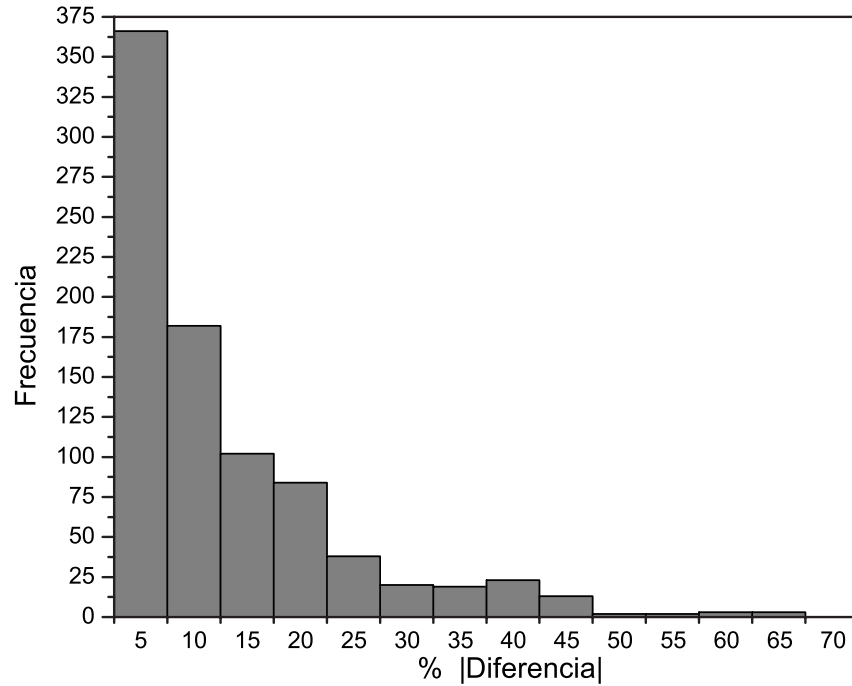


Figura 3.20: Histograma de frecuencias para las diferencias entre los resultados del simulador y los calculados con la metodología para el enfriamiento sensible requerido en un año.

mantener las condiciones de confort. Para lograrlo, se calcularon las diferencias que existen entre los ahorros de enfriamiento sensible que se estiman mediante los resultados del simulador y los ahorros que se estiman mediante los resultados obtenidos empleando la metodología. Se calcularon entonces los valores absolutos de las diferencias entre los dos resultados:

$$|dif A| \% = \frac{Ahorro_{simulador} - Ahorro_{calculado}}{Ahorro_{simulador}} \times 100 \quad (3.11)$$

La Tabla 3.12 muestra la distribución de la frecuencia y la frecuencia relativa acumulada para las diferencias de los resultados obtenidos mediante el simulador y la metodología en el cálculo del ahorro de enfriamiento sensible requerido en un año para mantener las condiciones de confort. Se eligieron nuevamente intervalos

de 5 %. Se observa que de las 568 condiciones consideradas en este análisis, 394 se tienen una diferencia menor al 5 %. Además, la frecuencia relativa acumulada muestra que la probabilidad de que un cierto caso tenga una diferencia menor al 20 % es aproximadamente del 96 %.

Tabla 3.12: Tabla de distribución de frecuencia y frecuencia relativa acumulada para las diferencias entre los resultados del simulador y los calculados con la metodología para el ahorro de enfriamiento sensible requerido en un año.

$ dif A $ %	Frecuencia	Frecuencia relativa acumulada
5	394	69.4 %
10	94	85.9 %
15	45	93.8 %
20	14	96.3 %
25	8	97.7 %
30	2	98.1 %
35	1	98.2 %
40	2	98.6 %
45	2	98.9 %
50	1	99.1 %
55	2	99.5 %
60	1	99.6 %
65	1	99.8 %
70	1	100.0 %
Total	568	

El análisis estadístico de todos los elementos de la muestra conduce a encontrar que la media aritmética de las diferencias es 3.99 %, la mediana de 3.6 % y la moda de -1 %. Para este caso, la desviación media es 2.77 % y la desviación estándar 7.5 %. En la Figura 3.21 se muestra el histograma de frecuencias para las diferencias entre los ahorros calculados con los resultados del simulador y los estimados con la metodología propuesta.

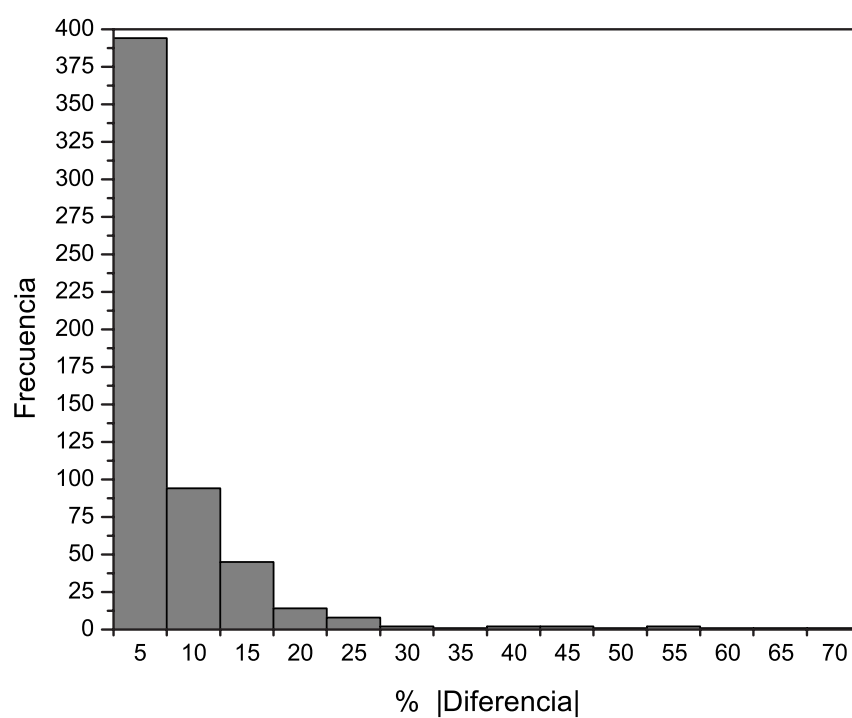


Figura 3.21: Histograma de frecuencias para las diferencias entre los resultados del simulador y los calculados con la metodología para el ahorro en el enfriamiento sensible en un año.

---

## CAPÍTULO 4

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

### 4.1. Conclusiones

El uso de equipos de acondicionamiento de aire facilita mantener las condiciones de confort higrotérmico del ser humano, pero eso significa el uso de una energía eléctrica considerable. El crecimiento poblacional promueve el aumento de la cantidad de clientes de la compañía que porvee energía eléctrica a tasa anual de casi 4.4 %. A mismo tiempo, en México se reporta la reducción de reservas probadas de hidrocarburos, que se estima para una duración de 10.2 años con la producción actual. Estos aspectos conducen al aumento de los precios de la energía eléctrica, encontrándose que del año 2000 al 2008 se registraron aumentos de 31 % en el sector doméstico y del 82 % en el sector industrial. Entonces, mantener las condiciones de confort con el uso de equipos eléctricos de acondicionamiento de aire se presenta cada vez más difícil.

La aplicación de aislamientos térmicos y filtros solares, debidamente empleados producen una importante reducción en el flujo de calor a través de la envolvente de las edificaciones. Esto se traduce en una disminución de la demanda de enfriamiento para los sistemas de acondicionamiento de aire. La oportunidad es muy grande, en razón de que al aplicar esta opción de forma masiva, se podrían alcanzar ahorros del orden del 30 % de su eléctrico en consumidores domésticos. Así la CFE dejaría de vender aproximadamente 4,888 GWh anualmente, cantidad que representa el 3 % de las ventas internas totales del año del 2008.

La simulación computacional puede emplearse para determinar la mejor colocación y el aislamiento térmico óptimo al caso en particular. La metodología para la aplicación adecuada de aislamiento térmico para viviendas Mexicanas expuesta en esta tesis comprende una serie de actividades que permiten identificar la mejor forma de ahorrar en el consumo de los sistemas de acondicionamiento de aire.

En la primera etapa de esta metodología se ha reunido la información necesaria para realizar los cálculos. Se requiere conocer la localización de la casa, la orientación cartográfica de la casa, la posición de la casa respecto a otras, el diseño y los materiales de construcción, el valor de la resistencia térmica equivalente de cada elemento de la envolvente y la geometría de la casa.

El asunto de la resistencia térmica de los elementos de la envolventes es muy importante y en algunos casos no es fácil estimarla, especialmente cuando los elementos están compuestos por materiales con distintas propiedades. Para resolver esos aspectos en este trabajo se empleó el software ANSYS-FLUENT, con el que a través de un método computacional llamado elementos finitos se resuelven las ecuaciones de transporte de calor para calcular el flujo de calor y la resistencia térmica equivalente con una muy buena aproximación. Este tipo de análisis se aplicó en este trabajo para evaluar con detalle los distintos elementos de la envolvente y tener así información confiable de cada uno de ellos.

En el estudio de los techos se encontró que cuando su estructura no es de un solo material y tiene una geometría interna variable se produce un flujo de calor diferenciado en su superficie. El flujo de calor en los techos se pueden reducir al colocar un aislante térmico. Adicionalmente, se debe poner atención en los puntos de unión y en la variaciones de los espesores del material, como en el caso de la vigueta-bovedilla. El caso que tiene mayor ahorro corresponde al techo de concreto cubierto con fibra de vidrio R10. En el caso de vigueta-bovedilla se puede lograr una gran mejoría al utilizar XPS en las costillas de de la vigueta para abatir el puente térmico en un 75 % aproximadamente, lo que produce una reducción del flujo total de un 61 %. La opción más favorecida con el uso del aislamiento corresponde a la aplicación de fibra de vidrio R13 en la parte interna del techo porque reduce la carga térmica en 79 % respecto al caso de vigueta-bovedilla sin aislamiento.

En la construcción de los muros existe una amplia variedad de materiales y opciones. En este estudio se encontró que un diseño que geométricamente es

---

semejante al sistema de vigueta-bovedilla presenta, una vez aislado, un mejor desempeño respecto a los muros de concreto, ladrillo o block. Para ese diseño se encontró que el puente térmico que se establece en las costillas es de gran importancia. Cuando la costilla es de concreto el flujo de calor es relativamente alto en esa región. Si a la unión se le coloca madera, el flujo de calor en los puentes térmicos un se reduce en 54 % y si se emplea XPS para romper el puente, la reducción es de hasta un 72 %, aproximadamente. Existe la posibilidad de tener huecos en los muros y que estén llenos de aire, y en esos casos, el movimiento del aire dentro de las cavidades ayuda a la transferencia de calor. Es importante decir que en caso de que los huecos en los muros estén comunicados entre sí, la intensidad de la convección de calor en el interior del muro depende la altura del muro.

Cuando se aísla una casa por partes en su área interna, las uniones de muros internos con los muros que tienen contacto con el exterior generan puentes térmicos, i.e. el muro interno entra en interacción con el exterior transfiriendo calor. Este problema se puede resolver al colocar una separación entre esos muros. Una opción es usar un aislante como el XPS, con lo que se reduce el flujo de calor entre muros en un 70 %. Si el aislamiento térmico se realiza por el área exterior de la casa no existe el problema del puente térmico entre muros

Es conveniente reducir el puente térmico entre los techos y los muros cuando se requiere aislar el techo de un cuarto que tiene refrigeración y éste está rodeado por cuartos contiguos sin refrigeración. Esto se puede lograr colocando el aislante en el área del techo que está por encima de los muros que comparten los cuartos sin refrigeración con el cuarto refrigerado. Incluso se puede extender el aislamiento térmico para cubrir el área del techo que corresponde a los cuartos no refrigerados y esto produce una disminución de la carga térmica hacia el cuarto refrigerado, sin embargo la máxima reducción de la carga térmica que se puede lograr es del 5 %.

En muchas ocasiones se opta por el uso de cortinas para reducir el calentamiento dentro de un recinto debido a la radiación solar. Esta opción reduce la luz visible, lo que no siempre resulta conveniente, además de los aspectos estéticos que restringen su uso en algunas construcciones. La colocación de filtros solares es una opción que permite una reducción considerable de la ganancia térmica, además de atenuar el paso de la luz facilitando la iluminación del recinto. En este estudio se encontró que la ganancia de calor que sufre un cuerpo que está expuesto a la radiación solar que

---

atravieza un acristalamiento se puede reducir de manera considerable con el uso de filtros comercialmente disponibles. Específicamete, se probaron filtros de la serie Ceramic con cédula P60, P40 y P20; el número de cédula indica el porcentaje de transmisión de luz visible. En las puebas se estimó que la carga térmica por unidad de área al emplear los filtros es del 60 %, 40 % y 20 %, respectivamente, respecto a la carga térmica que ocurre a través de un acristalamiento que no tiene filtro alguno. Se encontró entonces que la reducción en la ganancia de calor por los acristalamientos está relacionada con el porcentaje de transmisión de luz visible. La elección del filtro obedece a las necesidades de reducción de carga térmica y a la cantidad de luz visible que se requiere en el recinto. Otro aspecto que valdría la pena evaluar es la resistencia a la degradación de los filtros comerciales.

Una vez que se han estimado los efectos de todos los aspectos relevantes en el comportamiento del recinto, es posible continuar con la segunda etapa de la metodología. Se persigue la evaluación de la casa y la interacción que tiene con el medio ambiente que la rodea. Se lleva a cabo un estudio para estimar la carga térmica que tiene un recinto de características típicas en un año. Los estudios deben considerar los diferentes aspectos que modifican el comportamiento de la casa y evaluar el proceso transitorio de los cambios de las condiciones ambientales, los materiales de construcción, los diseños y dimensiones de casas típicas en México. En este análisis se empleó el simulador computacional Energy-Plus y se consideró la posibilidad de aplicar aislamiento térmico en techos y muros de forma localizada, además de la posibilidad de tener toda la casa aislada.

El análisis detallado de los resultados de las simulaciones de comportamiento de las casas a lo largo de un año permite entender el comportamiento global de todos los elementos que componen la casa habitación. Es posible conocer la relevancia que cada uno de los elementos tiene en la carga térmica total en la casa y la forma de reducir la demanda de refrigeración mediante la aplicación del aislamiento térmico más adecuado.

El análisis de los resultados mostró que, en general, las casa que tienen las menores cargas térmicas son aquellas que están orientadas hacia el norte y ubicadas al centro y a la izquierda, al igual que aquellas orientadas hacia el sur y ubicadas a la derecha.

Como podría esperarse, los ahorros en el consumo de energía son considerables al utilizar aislamientos térmicos y filtros solares. En general es más conveniente aislar

---

primero los techos y después los muros, sin embargo, el área de los muros es muy grande por lo que el aislamiento de éstos conviene hacerse en zonas específicas que deben elegirse de acuerdo a la reducción de la carga térmica que se logra. La mejor opción es desde luego aislar toda la casa pero eso es muy costoso y en términos prácticos poco óptimos.

Cada casa tiene un comportamiento particular que está definido por su posición, orientación y geometría, por lo que es difícil estimar de forma general la ganancia de calor. Sin embargo, con la construcción de una base de datos que incluya la información de las ganancias térmicas por unidad de área de cada uno de los elementos que componen casas de varios estilos y dimensiones, es posible estimar las cargas para casas de diseño y dimensiones hasta cierto punto arbitrario.

La información que se consigue con las simulaciones se organizó de forma conveniente de tal suerte que se utiliza en un programa de cómputo que estima la refrigeración empleada a lo largo de un año y el ahorro en la refrigeración que existe para un caso en particular cuando se le compara con el la refrigeración emplada cuando no se aplican aislamientos térmicos. Esta metodología resulta muy práctica para estimar las ventajas del uso de aislamientos evitando la necesidad del uso del simulador para casos particulares.

Se evaluó la confiabilidad que se puede tener con el uso de la metodología propuesta. Para ello se calcularon las diferencia entre los resultados estimados con la metodología y los valores reportados en la simulación. Entonces se realizó un análisis estadístico de las diferencias entre los resultados. En el cálculo de la refrigeración requerida en un año para mantener las condiciones de confort se tienen diferencias menores al 20 % en el 85 % de los casos. Por otra parte, en el cálculo del ahorro en la refrigeración requerida en un año se esperan diferencias menores al 20 % en el 96 % de los casos. Esto último se debe a que en el cálculo de la demanda de refrigeración para los casos aislados y sin aislar las diferencias respecto a los resultados del simulador deben ser del mismo tamaño y al restarlos para calcular el ahorro, las diferencias se anulan.

El aspecto importante a resaltar es que la confiabilidad de esta metodología descansa en que el caso que se desea estudiar en lo particular debe ser semejante en la medida de lo posible a los diseños arquitectónicos que se emplearon para generar la base de datos. La exactitud de los valores estimados se puede mejorar al ampliar

---



la base de datos con una mayor cantidad de modelo típicos de construcción. Lo recomendable es emplear con cautela la metodología cuidando emplearla en el análisis de casas que superen de manera exagerada las dimensiones de los modelos que se incluyen en la base de datos. Para estudios más exactos se recomienda hacer uso de un simulador complementado de ser necesario con un software que permita la caracterización de elementos de forma independiente.

Finalmente, la generación de soluciones óptimas está basada en la evaluación del ahorro económico que representan las reducciones en el consumo de energía eléctrica del sistema de acondicionamiento de aire. Una solución óptima es aquella en la que el costo de la instalación del aislamiento térmico se puede cubrir mediante el ahorro en el pago de la energía eléctrica. La mejor opción entonces debería representar una opción atractiva económicamente para los usuarios, y en el caso más desfavorable la ventaja está en la reducción en la energía que dejó de consumirse.

## 4.2. Recomendaciones

El sistema de acondicionamiento de aire es uno de los equipos que consumen más energía eléctrica. En lugares cálidos se convierte en un elemento necesario para tener condiciones de confort. Los usuarios de equipos de acondicionamiento de aire con frecuencia emplean sistemas con más de diez años de antigüedad, mismos que consumen energía en exceso, por lo que es recomendable adquirir uno nuevo. Existen modelos que cuentan con el sello FIDE, lo que garantiza un consumo de energía consistente con la norma oficial mexicana. Existen algunas recomendaciones simples que favorecen el ahorro de energía como las siguientes:

- Cuando los sistemas de acondicionamiento de aire están en operación hay que mantener la habitación cerrada.
  - Apagar los sistemas de aire acondicionado cuando exista una temperatura ambiente confortable o cuando las habitaciones van a estar desocupadas por más de una hora
  - Es conveniente apagar los sistemas media hora antes de salir del recinto
  - Ajuste el termostato de aire a 24°C en verano y a 19°C en invierno.
-

- Es recomendable sellar ventanas y puertas de la casa para evitar infiltraciones y fugas de aire.
- Regular la temperatura del sistema acondicionador de aire de tal manera que no se requiera de cobertor para dormir.
- Revisar periódicamente si la unidad necesita gas refrigerante.
- Llevar a cabo una limpieza general del equipo eliminando polvo y el moho
- Limpiar los filtros frecuentemente
- Vigilar que el motor, el cableado y el termostato funcionan correctamente.
- Dar mantenimiento cada año a todo el equipo
- Nunca se debe comprar un equipo con una capacidad superior a la necesaria
- El lugar más adecuado para situar el acondicionador de aire es la parte sombreada de la casa.
- Si es posible hay que colocar abanicos de techo o pedestal para aprovechar el movimiento de aire y lograr mayor confort
- Revisar que todos los ductos estén debidamente aislados

Siguiendo estas sencillas recomendaciones es posible reducir de forma importante la energía eléctrica que consume el sistema de acondicionamiento de aire.

### 4.3. Recomendaciones para trabajos posteriores

El presente trabajo estuvo enfocado en el análisis y evaluación de las cargas térmicas y la refrigeración requerida para casa habitación ubicadas en zonas climáticas cálidas. Es recomendable continuar con este tipo de estudios pero ahora enfocados en el ahorro de la energía que se consume en zonas del país que por sus características requiere de calefacción en invierno para mantener condiciones de confort.

---

Adicionalmente, resulta necesario que este tipo de análisis considere los efectos que tiene la humedad y los cambios de ésta en la carga térmica de los recintos habitacionales. Las infiltraciones son responsables en gran medida de la carga extra de refrigeración que se requieren debido al transporte de humedad que representan. El aspecto de la renovación de aire se debe tomar en consideración en edificaciones en los que existe un número elevado de personas y cuando se desarrollan actividades que liberan humedad. Existe una propuesta que considera el enfriamiento del aire de renovación mediante un intercambio de calor con el flujo que se rechaza de la edificación. Este último punto podría resultar en una oportunidad de ahorro energético.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Higinio Acoltzi, Itha Sánchez. Prospectiva para la evaluación del comportamiento energético de la vivienda con requerimientos de aire acondicionado. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos, México. pp 8. 2002.
- [2] Yunus A. Cengel. University of Nevada, Reno. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Mc Graw-Hill, Interamericana, pp. 423, 2007.
- [3] Carlos Andino. Historia de la casa habitación. [www.arq.com.mx](http://www.arq.com.mx). pp. 103, 2005.
- [4] Jürgen Mattheib. Hormigón armado aligerado y prensado: auxiliar para el diseño. Editor Reverte, pp. 1-2, 1980.
- [5] ASHRAE Fundamentals Handbook. Chapter 8, Thermal Comfort. 1997.
- [6] Isover, Saint-Gobain. Manual de Aislamiento en la Edificación. EL CONFOR TÉRMICO. <http://www.isover.net/asesoria/manuales>. pp 11, 2003.
- [7] Jorge Czajkowski, Alejandro Blasco, Soraya Rial. Aire acondicionado I: Definiciones y conceptos básicos. Instalaciones Térmicas. Febrero 2006.
- [8] Víctor Olgyay. Arquitectura y Clima. Editorial Gustavo Gili. pp. 16. 219 pp. 1998
- [9] J.E. Braun. Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of Building thermal storage. Member ASHRAE transactions SL-90-16-2.
- [10] M. Ibáñez Plana, J.R. Rosell Polo, J.I. Rosell Urrutia, Universitat de Lleida. Energías Renovables, Tecnología solar. Ediciones Mundi-Prensa. Cap 1.- Fundamentos y tecnologías básicas.

- 
- [11] García Chávez, J. R. Geometría Solar. Manual Arquitectura Solar, 1991.
- [12] Christoph Beck-1, Jürgen Grieser-1, Markus Kottenk-2, Franz Rubel-2 and Bruno Rudolf-1. Characterizing global climate change by means of Köppen climate classification. 1.-Global Precipitation Climatology Center, Deutscher Wetterdienst, Kaiserleistr. 44, 63067 Offenbach, Germany. 2.- Biometeorology Group, University of Veterinary Medicine, Veterinärplatz 1, 1210 Vienna, Austria.
- [13] Markus Kottek-1, Jürgen Grieser-2, Christoph Beck-2, Bruno Rudolf-2 and Franz Rubeli-1. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. 1.-Biometeorology Group, University of Veterinary Medicine Vienna, Vienna, Austria, 2.-Global Precipitation Climatology Centre, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Germany.
- [14] José L. Cortés. Reflexiones sobre el problema de la vivienda en México. UNAM, Revista difusión. [www.unam.mx/difusion/revista/oct2001/archi1.pdf](http://www.unam.mx/difusion/revista/oct2001/archi1.pdf). Octubre 2001.
- [15] Rodolfo Fernández, Alfredo Carella. Conservación de energía en viviendas y edificios. ESSO y la conservación de energía, Buenos Aires, circa 1981.
- [16] Hornbostel. Materiales para Construcción. Tipos, usos y aplicaciones. Ed. Limusa. 1999.
- [17] Martín L. Gutiérrez, Carlos Contreras. Materiales y procedimientos de construcción de la escuela mexicana de arquitectura de la universidad la Salle, Editorial Diana, 1ª edición, 20 de Enero de 1981.
- [18] Higinio Acoltzi, Itha Sánchez. Prospectiva para la evaluación del comportamiento energético de la vivienda con requerimientos de aire acondicionado. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Cuernavaca, Morelos, México.
- [19] Secretaria de Energía. Prospectiva del sector eléctrico 2008-2017. Dirección General de Planeación
- [20] Comisión Federal de Electricidad. Estadísticas. [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx). México 2009
-

- 
- [21] Secretaria de Energía, Reservas de Hidrocarburos [www.energia.gob.mx/webSener/res/204/reservas.doc](http://www.energia.gob.mx/webSener/res/204/reservas.doc), consultado el día 13 de abril de 2010. México 2008.
- [22] Secretaria de energía, Planeación Energética y Desarrollo Tecnológico. Estadísticas destacadas del sector energético Febrero 2010. <http://www.sener.gob.mx>, consultado el día 13 de abril de 2010.
- [23] Secretaria de Energía. Balance Nacional de Energía 2008. Subsecretaría de planeación energética y desarrollo tecnológico. Dirección General de planeación energética, primera edición, México, 2009.
- [24] Odón de Buen R., Jorge Montaña. Análisis comparativo de ganancias de calor en techos: Aislamiento térmico vs Superficie de baja absorción. <http://www.funtener.org/aislamiento.html>. México. Julio 2003.
- [25] CFE. Vivienda sustentable. Fideicomiso para ahorro de energía eléctrica. Abril 2009.
- [26] CFE. Uso racional de energía y medio ambiente, Nuevas tecnologías, Cogeneración y Energía renovable. Fideicomiso para ahorro de energía eléctrica. 5 de febrero 2009.
- [27] J.A. Clarke. Energy simulation in building design. Second edition. Butterworth Heinemann. 2001. pp 6.
- [28] Yunus A. Cengel, University of Nevada, Reno. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Mc Graw-Hill, Interamericana, 2007, pp. 423
- [29] Yogesh Jaluria. Design and Optimization of thermal systems. Ed. Mc Graw hill, 1998.
- [30] Suhas V. Patankar. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. pp.15.
- [31] Lawrence Berkeley National Laboratory, Energy Plus Engineering Reference, <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, 2009.
- [32] <http://www.bso.uiuc.edu/BLAST/main.html> , <http://www.doe2.com/>
-

- [33] Frank P. Incropera, David P. De Witt. Fundamentos de Transferencia de calor. Pretice Hall. Cuarta edición. pp. 223.
  - [34] Kuehn et al, Thermal Environmental engineering, Prentice Hall, 1998.
  - [35] J.E. Braun, Reducing energy costs and peak electrical demand through optimal control of building thermal storage, ASHRAE transactions 1990, pp.866
  - [36] ASHRAE, Fundamentals Handbook – Tabla 4 Typical Thermal Properties of Common Building and Insulating Materials. 1997.
  - [37] Alfa Gamma. Ficha Técnica, Bovedilla Alfa-Gamma. <http://www.alfagamma.com.mx/fichas/bovedilla.pdf>.
  - [38] Yunus A. Cengel, University of Nevada, Reno. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Mc Graw-Hill, Interamericana, 2007, pp. 159-160.
  - [39] Yunus A. Cengel, University of Nevada, Reno. Transferencia de calor y masa. Tercera edición. Mc Graw-Hill, Interamericana, 2007, pp. 533-540.
  - [40] CFE. Guía práctica, Ahorro energía eléctrica en el hogar.. [www.cfe.gob.mx](http://www.cfe.gob.mx). 2009
-

---

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Benjamín Zamudio Barrera nació en Texcoco, Estado de México el 07 de febrero de 1983. Es hijo del Dr. Benjamín Zamudio González y Lic. Martha Lorena Barrera de Zamudio.

Realizó sus estudios de Licenciatura en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, donde los terminó en diciembre del 2006 como Ingeniero Mecánico Electricista. Durante su estancia realizó sus prácticas profesionales del 21 de agosto al 21 de noviembre del 2006 en Prolec GE, ganando un concurso de investigación sobre Transformadores Industriales. Su titulación se dio por medio de la presentación de la tesis titulada, "Tiempo de estabilización del aceite mineral en transformadores industriales clase 15". Con el director de tesis M.C. Daniel Ramírez Villarreal.

En enero del 2008 inicia sus estudios de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmicas y Renovable, en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, con beca otorgada por la empresa Owens Corning México, en la cual se desempeñó como becario en el Departamento de Innovación. Durante su estancia de estudios de maestría realizó: pláticas sobre simulaciones computacionales y aislamientos térmicos impartidos en la Expo CIHAC en el Distrito Federal, participó en los estudios necesarios para la implementación de aislamientos térmicos en Oxxo y casas de Homex, participó en el desarrollo de un software para la simulación de la aplicación de aislamiento térmico en casas para ser expuesto en las tiendas comerciales Home Depot, dio una ponencia con el tema: "Desarrollo de una herramienta para la elección de aislamiento térmico en viviendas" el 12 de agosto del 2009 en la Facultad de Ingeniería

---



---

Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, participó en la elaboración de artículos titulados, “Análisis térmico de sistemas constructivos para techos elaborados a base de Vigüeta-Bovedilla” y “Estudio de la ganancia de calor a través de la unión entre elementos externos y paredes internas de una edificación” para el congreso internacional de la SOMIM 2010.

Su experiencia laboral formalmente fue obtenida a través de la empresa: Grupo Aislacon, como Auxiliar de Ingeniería, en el Diseño de cámaras frigoríficas del 18 de septiembre del 2007 al 4 de enero del 2008, y en la empresa Organización Camaro, como Ingeniero Residente, en el proyecto de poda de árboles para CFE en la ciudad de Monclova, Coahuila y sus alrededores durante el mes de abril del 2007.

---